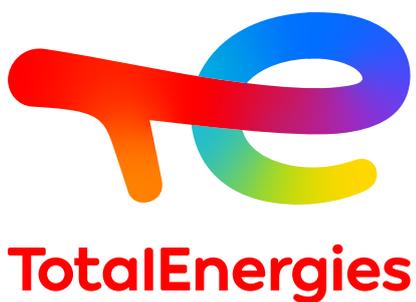




Panorama des énergies



En partenariat avec

Colette Lewiner

et





Introduction

Au cours des siècles, les hommes ont appris à domestiquer les éléments naturels et à se servir des ressources de la terre pour produire l'énergie dont ils avaient besoin car l'énergie est fondamentale à la vie humaine et à son développement.

Ils ont d'abord utilisé la biomasse (dont le bois), le charbon et le soleil pour se chauffer et faire cuire leurs aliments, le vent et les courants hydrauliques pour faire tourner les meules.

De tout temps, l'homme a été exposé à l'électricité, notamment avec la foudre et, dans l'antiquité, les Grecs s'intéressaient déjà à ses propriétés¹. Cette forme d'énergie n'a été comprise et maîtrisée qu'à partir du XVIII^e siècle et particulièrement au XIX^e siècle où elle a été employée pour la traction, grâce au moteur électrique et pour communiquer à distance grâce au télégraphe.

L'utilisation de l'électricité et la mise au point de la machine

à vapeur (transformation de l'énergie calorifique en énergie mécanique) ont permis la révolution industrielle. Le charbon a été le combustible sous-tendant cette révolution.

Au milieu du XIX^e siècle, le pétrole, déjà utilisé pour l'éclairage, commence à être extrait et raffiné. Il est utilisé pour ses propriétés chimiques et brûle facilement, dégageant beaucoup de chaleur. C'est une forme d'énergie très concentrée. Si l'utilisation du gaz naturel (méthane) débute dès le début du XIX^e siècle pour l'éclairage public, elle ne deviendra massive qu'au milieu du XX^e siècle avec notamment la substitution du méthane au gaz de ville (fait à partir de charbon).

¹Thalès de Milet, aux alentours de 600 avant JC.

Au milieu du XX^e siècle, à la suite des découvertes scientifiques d'Albert Einstein, l'électricité nucléaire devient une réalité.

En grande partie motivée par des considérations environnementales, la société redécouvre massivement au XXI^e siècle les énergies « traditionnelles » vent, soleil, biomasse pour leur caractère renouvelable.

Ce bref historique, montre que l'énergie est en perpétuelle transformation :

- L'énergie chimique des piles en énergie électrique puis mécanique,
- L'énergie chimique du pétrole, gaz ou charbon en énergie calorifique puis en énergie mécanique ou électricité,
- L'énergie potentielle des chutes d'eau en énergie mécanique ou en électricité,
- L'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et plus récemment en électricité,
- L'énergie solaire en énergie calorifique et plus récemment directement en électricité,
- L'énergie nucléaire en électricité.

L'électricité est une forme élaborée d'énergie qui peut être produite avec de nombreuses énergies primaires (hydraulique, solaire, éolien, énergies fossiles, uranium) et transformée avec très peu de pertes en énergie mécanique ou chaleur utilisable par le consommateur. C'est pour cela que l'on parle du vecteur électricité.

Les transformations d'une forme d'énergie à une autre, peuvent se faire sans coût énergétique (le rendement de conversion est alors de 100%) ou avec de la déperdition d'énergie (le rendement est inférieur à 100%).

Selon le premier principe de la thermodynamique, l'énergie se conserve. Selon le second principe (principe de Carnot), on ne peut pas avoir un rendement de 100% dans la conversion de la chaleur en énergie mécanique ou électricité². Le rendement varie selon les installations mais il est typiquement de 35-40%. Le rendement de conversion des photons du soleil en électricité est plus faible (entre 7 et 25%).

Les caractéristiques des différentes formes d'énergie varient beaucoup et on retiendra notamment :

Le stockage : Certaines sont stockables facilement, comme les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et certaines énergies renouvelables (biomasse). Ce sont des énergies « en conserve ». La force de l'eau, le rayonnement solaire ou le vent sont quant à eux des « flux d'énergies renouvelables » qui doivent être captés à chaque instant. Cela n'est possible que s'il y a du vent, de l'eau dans la rivière ou du soleil. L'électricité est actuellement encore difficilement stockable.

La disponibilité : Ces énergies ne sont pas toutes disponibles quand le besoin apparaît. L'électricité produite à partir de gaz ou l'électricité nucléaire est toujours disponible lorsqu'on en a besoin, elle est dite programmable. En revanche l'électricité éolienne ou solaire n'est disponible que s'il y a du vent ou du soleil. Ces énergies renouvelables de flux sont intermittentes.

Le caractère concentré ou diffus : Certaines formes d'énergie sont très concentrées, c'est le cas du pétrole, du charbon ou de l'uranium. D'autres sont diffuses, elles nécessitent beaucoup plus de place pour la même production d'énergie ; c'est le cas de l'énergie solaire ou éolienne. 1 litre de pétrole peut produire autant d'énergie que 1 000 litres de gaz ou 50 m² de panneaux photovoltaïques à midi durant 1 heure lorsque le ciel est dégagé et que les rayons tombent perpendiculairement aux panneaux³.

Le coût : Les énergies abondantes et matures sont meilleur marché que certaines énergies rares ou en cours de développement technique (énergies fossiles par rapport à l'hydrogène décarboné par exemple).

L'impact sur l'environnement : La production et la consommation d'énergie ont un impact négatif sur l'environnement de nature et d'ampleur variables selon les types d'énergies. C'est le cas notamment des énergies fossiles.

Il faut donc être prudent lorsqu'on compare ces énergies et il est nécessaire de prendre en compte toutes leurs caractéristiques et de bien définir ce dont on parle. Ce point est analysé plus loin.

²La conversion de chaleur en électricité nécessite une source chaude et une source froide. Le rendement de conversion dépend de l'écart de température entre la source chaude et la source froide.

³Les caractéristiques sont détaillées dans le chapitre 4.

Le réchauffement climatique

Le réchauffement climatique anthropique est une réalité reconnue par le monde scientifique, il est dû à l'accumulation de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère.



Le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane, la vapeur d'eau ou l'ozone, ainsi que d'autres gaz, lorsqu'ils sont émis vont s'accumuler dans l'atmosphère et créer une couche qui laisse passer les rayons du soleil vers la terre mais qui empêche les rayonnements infrarouges émis par les corps chauffés de sortir de l'atmosphère. Ils agissent comme le plafond de verre des serres et contribuent donc à conserver la chaleur, d'où leur nom de gaz à effet de serre (GES). Ils ont un effet de réchauffement de notre planète.

Durant le XX^e siècle et le début du XXI^e siècle, l'augmentation de la population mondiale et du niveau de vie moyen se sont traduits par une consommation croissante d'aliments, de ressources naturelles végétales ou minérales et d'énergie.

Il en résulte une augmentation forte des émissions de GES qui contribuent au réchauffement de la planète. Celles-ci ont plus que doublé depuis 50 ans. La consommation d'énergies fossiles pour le chauffage, le transport ou la production d'électricité est responsable de plus de 80%⁴ des émissions mondiales de CO₂ et de l'ordre de deux tiers des émissions de GES.

Le réchauffement climatique nécessite des efforts sans précédent pour réduire les émissions de GES sans compromettre pour autant la poursuite de l'amélioration du niveau de vie, notamment dans les pays en développement.

Le développement des pays occidentaux est largement à l'origine du stock de GES présent dans l'atmosphère. Il est désormais temps pour ces pays de maîtriser leurs émissions, c'est-à-dire d'**éviter d'en générer de nouvelles chaque fois que cela est possible mais aussi de les réduire voire de séquestrer le carbone émis** pour créer des « émissions négatives ». Il faut aussi que d'autres grands pays émetteurs (la Chine par exemple) réduisent leurs émissions. Face à l'**urgence à agir**, presque tous les pays de la planète ont signé l'Accord de Paris⁵ en 2015. Ils se sont fixés pour objectif de contenir le réchauffement de la planète nettement en dessous de 2°C, et de poursuivre l'action menée pour limiter ce réchauffement à 1,5°C, par rapport aux niveaux préindustriels, en visant à la neutralité carbone nette (équilibre entre les émissions anthropiques et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre) au cours de la deuxième moitié du vingt-et-unième siècle.

⁴Chiffre clés du climat - Edition 2021 - I4CE

⁵<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

Ce panorama des énergies a pour objectif de faire comprendre les différentes formes d'énergie, leur origine et leur utilisation, de les caractériser afin d'en permettre une comparaison éclairée, d'appréhender les progrès technologiques déjà accomplis et ceux à venir.

Ce document vise également à donner des clés de compréhension sur les enjeux climatiques ainsi que les avancées nécessaires pour assurer un approvisionnement avec une énergie qui soit abordable en prix, fiable et la plus décarbonée possible en vue de limiter le réchauffement de notre planète, un défi qui nous concerne tous. Il a été réalisé en partenariat avec Colette Lewiner et la société Capgemini.

Table des matières

CHAPITRE 1 - L'OFFRE D'ÉNERGIE	09		
1.1 Notions de bases et définitions	10		
Les différentes formes d'énergie	10		
Les unités de mesure	11		
Le pouvoir calorifique	13		
Le rendement thermique	13		
1.2 Les différentes formes d'énergie produites	14		
Les énergies fossiles	15		
La biomasse	17		
La géothermie	20		
L'électricité	20		
L'hydrogène	24		
1.3 Les grands enjeux de l'offre d'énergie	26		
Accélérer la maturité technologique des énergies	26		
Améliorer le rendement	28		
Améliorer le stockage	30		
Innover dans le nucléaire	31		
Exploiter le numérique pour optimiser production et consommation	31		
1.4 Conclusion	32		
CHAPITRE 2 : LA DEMANDE D'ÉNERGIE	35		
2.1 Quelles énergies pour quels usages ?	36		
Les types d'énergie selon leur degré de transformation et leur praticité	37		
La logistique de transport, distribution et stockage de l'énergie	39		
		Les usages et leurs solutions énergétiques	41
		2.2 La consommation d'énergie	48
		La sécurité d'approvisionnement énergétique	48
		La consommation d'énergie mondiale est en croissance	50
		La consommation d'électricité, vecteur de décarbonation de l'économie, augmente plus vite que celle en énergie primaire	51
		La consommation d'énergie par secteur	54
		Evolution de la consommation d'énergie, une situation contrastée entre pays développés et pays en développement	55
		CHAPITRE 3 - LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	63
		3.1 Introduction	64
		3.2 L'effet de serre	66
		3.3 Les Gaz à Effet de Serre (GES)	68
		Durée de vie des GES dans l'atmosphère : l'équivalent CO ₂	70
		La concentration en carbone de l'atmosphère	71
		3.4 Les réservoirs de carbone	72
		Les réservoirs de carbone naturels	73
		Les puits de carbone artificiels	75
		3.5 Activité humaine et émissions de GES	76
		Emissions de GES par secteur	77
		Les émissions de GES liées à l'énergie	77
		Emissions de GES par pays	79
		Perspectives d'évolution des GES	81

CHAPITRE 4 – LA COMPARAISON DES ÉNERGIES	85		
4.1 Introduction	86		
4.2 Caractéristiques des énergies	88		
La densité énergétique	90		
Disponibilité et impact de l'intermittence sur le réseau électrique	91		
4.3 Comment comparer le coût des énergies entre elles ?	94		
Comparaison des coûts moyens de production d'électricité	95		
Comparaison des coûts de l'énergie pour le transport terrestre	98		
Pour aller plus loin – Quelles méthodologies pour convertir des énergies ayant des propriétés et des mesures différentes ?	99		
4.4 Synthèse	102		
CHAPITRE 5 – COMMENT ASSURER L'APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE TOUT EN DÉCARBONANT L'ÉCONOMIE ?	109		
5.1 Les leviers d'action : éviter, réduire, compenser	110		
La neutralité carbone	112		
Réinventer et accélérer le développement d'un mix énergétique diversifié et décarboné	113		
Investir dans l'efficacité énergétique	113		
		Adapter les énergies aux usages	113
		Accélérer le progrès technologique	114
		Renforcer et créer des puits de carbone pour atteindre l'objectif net Zero (ou de neutralité carbone)	114
		Mesurer	116
		Accompagner par des politiques publiques	116
		Poursuivre la mobilisation des entreprises	120
		Faire du secteur financier un acteur majeur de la limitation du risque climat	121
		Associer les citoyens et faire évoluer les comportements des individus	122
		5.2 Conclusion	124



1

L'offre d'énergie

1.1

Notions de bases et définitions

LES DIFFÉRENTES FORMES D'ÉNERGIE

Stockée dans les objets, les molécules et les atomes, l'énergie se manifeste de multiples façons. Dans le passé, l'homme a utilisé les éléments naturels pour produire de l'énergie, soit sous forme d'énergie mécanique (vent, chutes d'eau) pour faire tourner des moulins, soit sous forme d'énergie calorifique (bois pour faire du feu). Avec le temps, l'homme a su maîtriser un ensemble d'énergies plus large et définir la manière dont elles interagissaient entre elles. Elles se présentent sous différentes formes : l'énergie mécanique composée de l'énergie cinétique d'un objet en mouvement et de l'énergie potentielle stockée dans un objet fixe, l'énergie calorifique due à l'agitation des molécules, l'énergie chimique associée aux liaisons entre les atomes d'une molécule, l'énergie par rayonnement, l'énergie nucléaire stockée au centre de l'atome, l'énergie électrique et l'énergie de gravitation.



LES UNITÉS DE MESURE

Les unités de mesure reflètent souvent les utilisations originelles de l'énergie. A la suite du remplacement du cheval par des machines à vapeur et l'automobile, la puissance a continué à s'exprimer en « chevaux vapeur ».

Les combustibles fossiles ont également imprimé leur marque sur les unités de mesure d'énergie utilisées, avec un poids important du pétrole, en tant que ressource stratégique. On mesure ainsi l'énergie en baril⁶ ou tonne équivalent de pétrole. La consommation de pétrole annuelle est usuellement mesurée

en million de barils par jour⁷.

À ceci s'ajoute l'existence de plusieurs systèmes de référence dont le système anglo-saxon et le système international qui possèdent des conventions différentes : une même température peut s'exprimer en degré Fahrenheit ou Celsius et on parle souvent de « cubic feet » (pied⁸ cube) de gaz plutôt que de mètre cube. L'aspect pratique et intuitif des anciennes unités a conduit à les conserver.

Energie

L'unité officielle du système international (SI) est le Joule (J), égal au travail produit par une force de 1 Newton⁹ dont le point d'application

se déplace de 1 m dans la direction de la force. Elle est indépendante de la source d'énergie considérée : 1 J produit à partir d'électricité venant d'une éolienne ou de la combustion de gaz va chauffer de manière identique une certaine quantité d'eau.

Puissance

C'est la capacité à libérer de l'énergie par unité de temps et au Joule, unité d'énergie, correspond le Watt (W), unité de puissance : une puissance de 1 W mise en jeu pendant 1 seconde libère une énergie de 1 joule. 1 Ws (Watt seconde) = 1 J et 1 Kilowatt heure (kWh) est l'énergie libérée en 1 heure par une source de puissance de 1 000 W, elle est égale à 3,6 MJ. On distingue souvent le

⁶Un baril a un volume de 159 litres. En spécifiant la qualité du pétrole et sa densité on peut passer des tonnes de pétrole au baril.

Dans une tonne de pétrole il y a en moyenne 7,3 barils.

⁷Un baril par jour correspond à peu de chose près à 50 tonnes par an.

⁸Dans un mètre, il y a 3,28 pieds.

⁹Le newton est la force colinéaire au mouvement qui, appliquée pendant une seconde à un objet d'un kilogramme, est capable d'ajouter (ou de retrancher) un mètre par seconde à sa vitesse

kWh électrique, énergie libérée pendant 1 heure par un appareil électrique de puissance 1 kW, et le kWh thermique, qui se réfère à la quantité équivalente de chaleur.

Unités d'énergie couramment employées

Historiquement, la calorie a longtemps été employée pour mesurer les quantités de chaleur. Elle représente l'énergie nécessaire pour élever la température de 1 gramme d'eau de 1 °C à la pression atmosphérique : 1 calorie = 4,187 joules.

Une définition équivalente est utilisée dans le système anglo-saxon, celle de la British Thermal Unit ou BTU qui représente la quantité de chaleur nécessaire pour accroître d'un degré Fahrenheit (°F) la température d'une masse d'eau d'une livre (pound¹⁰), ce qui implique 1 BTU = 251,984 calories.

Unités dérivées

L'importance du pétrole dans les bilans énergétiques de nombreux pays, explique que l'on exprime fréquemment les quantités d'énergie en les ramenant à leur équivalent pétrole, qui se réfère au pouvoir calorifique d'une certaine quantité de pétrole. On parle ainsi de tonnes équivalent pétrole (tep). Par convention, elle équivaut à la quantité d'énergie qui peut être extraite d'une tonne de pétrole brut doté d'un pouvoir calorifique inférieur (voir ci-dessous) de 41 868 kilojoules / kg.

Le baril équivalent pétrole (bep) est également très largement utilisé, notamment pour additionner des productions ou des réserves de pétrole et de gaz naturel. Il équivaut à la quantité d'énergie qui peut être extraite dans un baril (environ 159 litres) de pétrole de qualité donnée. Pour comparer un baril (unité de volume) à une tonne de pétrole (unité

de poids), il faut définir la masse volumique¹¹ du pétrole.

Pour le gaz naturel, on emploie les mètres cubes normalisés (Nm³ ou standard Sm³) ou les pieds cubes normalisés (Ncf ou standard Scf)¹²

Les unités de base définies correspondant à de faibles quantités d'énergie, leurs multiples sont le plus souvent utilisés pour décrire leur utilisation journalière ou dans les bilans mondiaux : Kilojoule (KJ) pour mille (10³) joules, Mégajoule (MJ) pour 1 million (10⁶) de joules, Gigajoule (GJ) pour 1 milliard (10⁹) de joules, Térajoule (TJ) pour mille milliard (10¹²) de joules, Pétajoule (PJ) pour un million de milliard (10¹⁵) de joules, Exajoule (EJ) pour un milliard de milliard (10¹⁸) de joules.

de	Kjoules	kWh	BTU	Tep	Nm3 gaz	Ncf gaz
1 Kjoule =		2,78 x 10 ⁻⁴	0,948	2 x 10 ⁻⁸	2,6x10 ⁻⁵	0,9 x 10 ⁻³
1 kWh =	3600		3412	8,6 x 10 ⁻⁵	0,1	0,3
1 BTU =	1,055	2,93 x 10 ⁻³		2,5 x 10 ⁻⁸	3 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻³
1 Tep =	41,868 x 10 ⁶	11628	39,685 x 10 ⁶		1136	50 x 10 ³
1 Nm ³ gaz =	38 x 10 ³	10,28	35,069 x 10 ³	8,8 x 10 ⁻⁴		37,24
1 Ncf gaz =	1076,1	3	1020	2 x 10 ⁻⁵	0,027	

Figure 1.1 : Equivalences d'unités de mesure de l'énergie

Source : IEA (2021), Key World Energy Statistics 2021, IEA, Paris

<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021> All rights reserved.

¹⁰La livre couramment utilisée de nos jours est soit la livre anglaise qui pèse exactement 453,59237 g, soit la livre métrique d'un demi-kilogramme (exactement 500 grammes).

¹¹La masse volumique d'une espèce chimique est égale au rapport entre sa masse et le volume qu'elle occupe dans les conditions standard de température et de pression (à 25°C, 1 atmosphère pour les m³).

¹²Conditions standard de température et de pression

LE POUVOIR CALORIFIQUE

L'énergie emmagasinée dans une matière combustible s'appelle le pouvoir calorifique ou chaleur de combustion.

Lors de la combustion du gaz, la réaction chimique produit de la vapeur d'eau et du gaz carbonique (CO_2) et dégage une certaine quantité de chaleur. L'énergie qui a servi à chauffer la vapeur d'eau contenue dans les gaz qui partent en fumée peut être considérée comme perdue. On obtient donc deux notions pour ce que l'on appelle le pouvoir calorifique :

- **Le pouvoir calorifique supérieur** PCS (en anglais *Gross Heating Value*) qui est une propriété intrinsèque du combustible. Il est défini comme la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible (une tonne ou un m^3 par exemple), mais aussi celle dégagée par la chaleur latente de vaporisation de l'eau, celle-ci étant supposée récupérée si la vapeur d'eau émise est condensée,
- **Le pouvoir calorifique inférieur** PCI (en anglais *Net Heating Value*) est aussi une propriété intrinsèque

du combustible. C'est l'énergie thermique du combustible qui est libérée par la combustion sous forme de chaleur, à l'exclusion de l'énergie perdue quand on ne récupère pas la vapeur d'eau (chaleur latente) en fin de réaction ; elle est donc toujours inférieure au PCS.

L'écart entre le PCI et le PCS d'une chaudière permet de mesurer son efficacité, plus il est faible, plus grande est l'efficacité (peu de pertes d'énergie dans les vapeurs). Ainsi une chaudière à condensation, dont le principe est de récupérer une partie de l'énergie de la vapeur d'eau, a une efficacité énergétique supérieure d'environ 10% à celle d'une chaudière classique.

LE RENDEMENT THERMIQUE

La production d'électricité repose notamment sur le principe de Carnot. Selon ce principe, on ne peut produire de l'électricité à partir de chaleur qu'avec une machine (dite machine de Carnot) qui comporte une source chaude et une source froide. Le rendement de cette conversion (R)

est inférieur à 100% et dépend de la différence de température entre les deux sources de chaleur. Plus cette différence est importante, meilleur est le rendement : habituellement voisin de 33%, il peut atteindre plus de 60% dans les Centrales à Gaz à Cycle Combiné.

Ceci veut dire que pour produire 1 joule d'électricité il faut utiliser 1/R, soit environ 3 joules¹³ de combustibles fossiles, si $R=33\%$. Dans cet exemple, on convertira un joule d'énergie électrique en 3 joules d'énergie fossile. 1/R est donc le multiplicateur qui permet de passer de l'énergie électrique utilisée à l'énergie fossile qui a permis de la générer. Nous l'appellerons facteur de conversion.

Le résultat de conversion dépend de la valeur retenue pour le rendement (R), mais aussi d'autres facteurs comme l'utilisation des pouvoirs calorifiques supérieurs ou inférieurs. De même, il faut spécifier si la quantité d'électricité produite est brute ou nette (c'est-à-dire avant ou après prise en compte des pertes en ligne).¹⁴

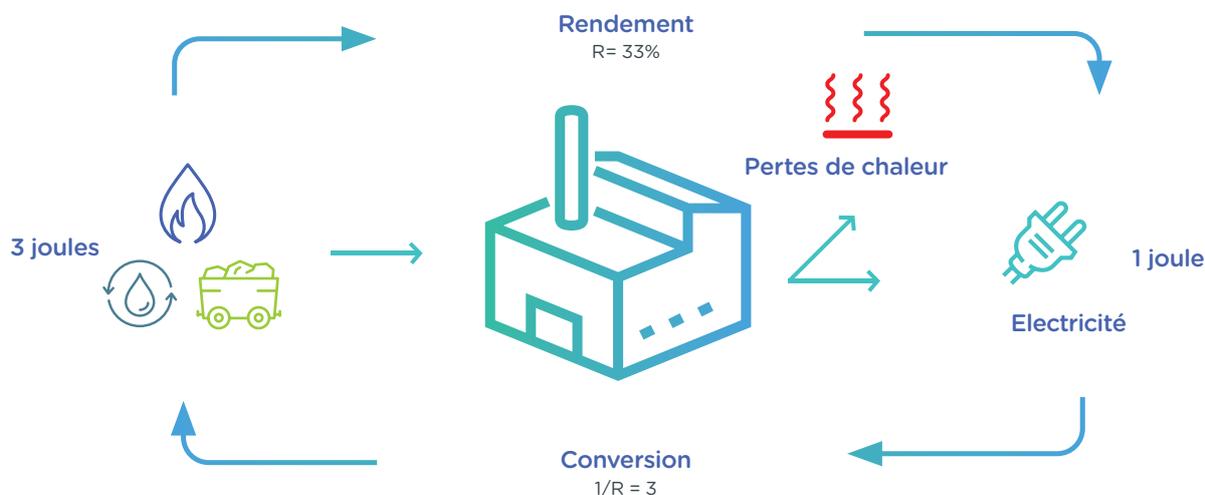


Figure 1.2 : Illustration du rendement et de la perte de chaleur pour produire de l'électricité

Source : Analyse Capgemini

¹³Ce coefficient de conversion thermique est égal à 3 pour un rendement de 33,33% et à 2,5 pour un rendement de 40%

¹⁴La production brute d'électricité au niveau de la centrale est définie comme l'électricité mesurée à la sortie des transformateurs principaux. La production nette d'électricité est égale à la production brute d'électricité moins la consommation des services auxiliaires des centrales

1.2

Les différentes formes d'énergie produites

Les sources d'énergie se présentent sous différentes formes qui sont décrites dans ce paragraphe. Elles ont de multiples différences : origine, répartition géographique, part dans le mix énergétique mondial, potentiel de développement et empreinte carbone. On distinguera les énergies fossiles, charbon et hydrocarbures (pétrole et gaz), des énergies faiblement carbonées, nucléaire et énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, biomasse et géothermie).



LES ÉNERGIES FOSSILES

Qu'est-ce que c'est ?

Les énergies fossiles sont les sources d'énergie les plus utilisées à l'heure actuelle à travers le monde. Il en existe trois formes : le charbon, le pétrole et le gaz (ces deux dernières sont appelées hydrocarbures). Elles représentent aujourd'hui la majeure partie de l'énergie consommée dans le monde avec, en 2019, respectivement 162 EJ, 187 EJ et 141 EJ soit environ 80% de la consommation mondiale (607 EJ).¹⁵

Elles sont appelées énergies fossiles car elles sont issues de la transformation de matières

organiques sous l'effet de l'augmentation de température et de pression lors de leur enfouissement sous des couches de sédiment de plusieurs centaines à milliers de mètres. Ce processus de dégradation dure depuis des millions d'années. Les hydrocarbures formés dans cette matière organique enfouie appelée « roche-mère », vont migrer vers la surface et être éventuellement piégés dans la roche-réservoir ou « gisement » lorsqu'ils rencontrent des volumes de roche poreuse recouverts par une couche de sédiments imperméables. Le charbon correspond à la transformation de cette matière organique en une matière solide et combustible à haute teneur en carbone.

La production de charbon passe par des mines à ciel ouvert ou souterraines. L'exploitation des hydrocarbures passe en grande majorité par le forage de puits de production à terre ou en mer à des profondeurs pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres.

Où sont les ressources ?

Les ressources fossiles, du fait de leur mécanisme de génération, se trouvent là où la nature les a mises. Elles sont donc inégalement réparties sur la planète. 10 pays¹⁶ détiennent 86% des réserves mondiales de pétrole et 10 pays possèdent un peu moins de 80% des réserves mondiales¹⁷ de gaz. Le charbon est une ressource

¹⁵Source : IEA (International Energy Agency) (2021) Key World energy Statistics 2021, <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply>. All rights reserved.

¹⁶Ces pays sont dans l'ordre décroissant des réserves : le Venezuela, l'Arabie Saoudite, le Canada, l'Iran, l'Irak, la Russie, le Koweït, les Emirats Arabes Unis, les Etats-Unis et la Lybie

	Pétrole (milliards de barils)		Gaz (trillions de mètres cube)		Charbon (milliards de tonnes)	
Amérique du Nord	238	14%	16	7%	257	24%
Amérique du Sud et Centrale	293	17%	8	3%	14	1%
Europe	15	1%	5	2%	135	13%
Afrique	126	7%	19	8%	15	1%
Moyen-Orient	834	49%	81	35%	1	0%
Eurasia	146	9%	77	34%	191	18%
Asie Pacifique	151	3%	22	10%	457	43%
Monde	1702	100%	229	100%	1070	100%

Figure 1.3 : Réserves de combustibles fossiles par région et dans le monde
 Source : IEA (International Energy Agency) (2020) World Energy Outlook 2020, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> All rights reserved.

abondante et présente quasiment partout mondialement ce qui explique l'importance qu'elle revêt encore aujourd'hui dans le mix énergétique, même si 10 pays¹⁸ détiennent environ 90% des réserves mondiales.

Le niveau des ressources est estimé en tenant compte du coût acceptable pour l'exploitation des gisements. Quand ce coût est trop élevé, le pétrole, gaz ou charbon sont amenés à rester en place et ne constitueront jamais une ressource. L'essor des

hydrocarbures non-conventionnels, qui exploitent notamment les hydrocarbures directement dans la roche-mère, a mis à jour des ressources qui n'étaient pas considérées exploitables auparavant.

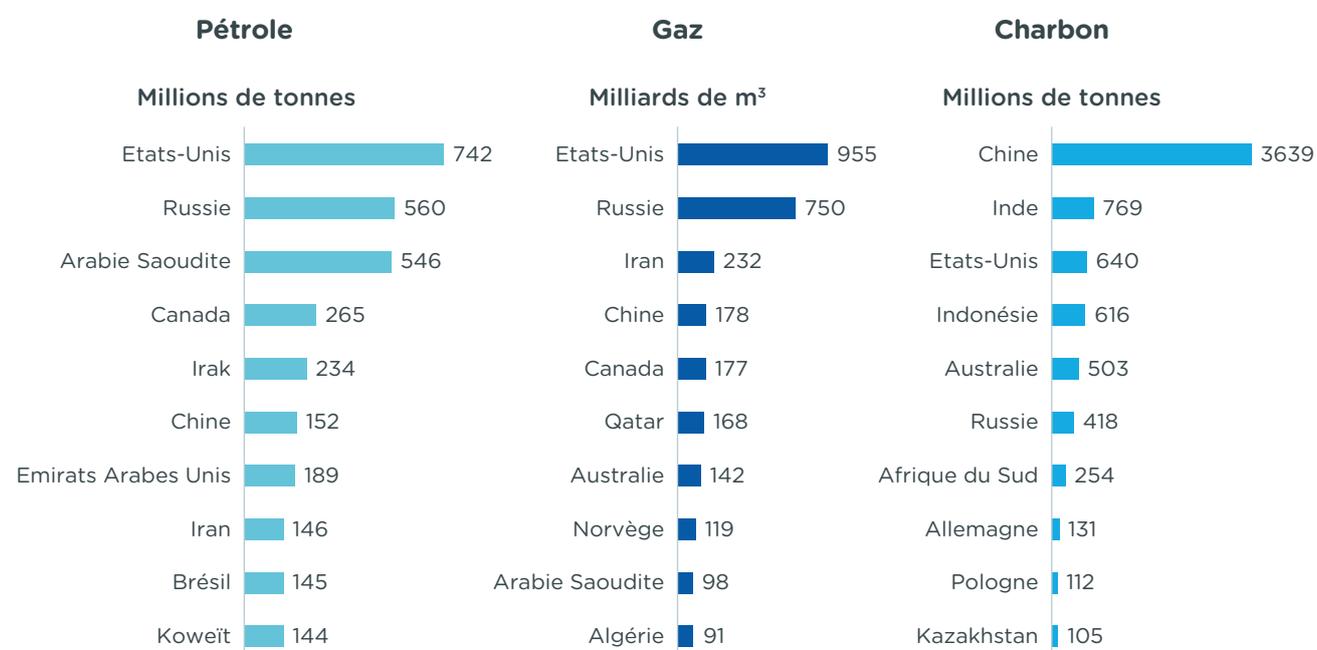


Figure 1.4 : Les principaux producteurs de pétrole, charbon et gaz dans le monde en 2019 en Mt et milliards de m³

Source : IEA (International Energy Agency) (2020) Key World energy statistics 2020. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>. All rights reserved.

¹⁷Ces pays sont dans l'ordre décroissant des réserves : la Russie, l'Iran, le Qatar, le Turkménistan, les Etats-Unis, le Venezuela, la Chine, les Emirats Arabes Unis, l'Arabie Saoudite et le Nigeria.

¹⁸Ces pays sont dans l'ordre décroissant des réserves : les Etats-Unis, la Russie, l'Australie, la Chine, l'Inde, l'Indonésie, l'Allemagne, l'Ukraine, la Pologne et le Kazakhstan

Quels sont les niveaux de production ?

Les quantités d'énergie produite à partir d'énergies fossiles à l'échelle du monde sont très importantes, en voici quelques chiffres significatifs :

Le pétrole

La production de pétrole a augmenté chaque année pour atteindre près de 100 millions de barils par jour en 2019¹⁹. A cause de la pandémie de la Covid-19 et des confinements successifs, elle a légèrement baissé en 2020, une première depuis 10 ans.

Grâce à l'exploitation des pétroles de schistes²⁰, les Etats-Unis sont devenus le plus gros producteur de pétrole mondial.

Le gaz naturel

En 2019, la production mondiale de gaz naturel s'élevait à plus de 4000 milliards de mètres cubes²¹. Comme pour le pétrole, la découverte et la production de gaz de schistes²² ont permis aux Etats-Unis de devenir le premier producteur mondial de gaz. Comme pour le pétrole, la pandémie a fait légèrement diminuer le niveau de production en 2020.

L'essor du Gaz Naturel Liquéfié, GNL, qui consiste à refroidir le gaz à des températures très faibles (-162°C) permettant de le transporter par navire à l'état liquide, occupant ainsi un volume beaucoup plus faible, a contribué à faire du gaz une commodité transportable à travers le monde en grande quantité et échangeable au même titre que le pétrole. Les marchés du gaz restent

néanmoins plus petits et plus spécialisés que ceux du pétrole.

Le charbon

Dans le monde, environ 8 milliards de tonnes de charbon ont été produites en 2019. La Chine qui a de très importants besoins énergétiques est le premier producteur mondial.

Les énergies fossiles dominent le mix énergétique mondial. En revanche, du fait de leur processus de reconstitution à l'échelle des temps géologiques, **leur stock est fini et elles sont amenées à s'épuiser à long terme**, plus ou moins vite selon l'évolution de leur consommation. Du fait de la perte de pression lors de leur exploitation, les gisements d'hydrocarbures font également face à un déclin naturel de l'ordre de 5% en moyenne par an ce qui nécessite des investissements réguliers afin de maintenir un même niveau de production. De plus, la consommation des énergies fossiles émet beaucoup de GES : 14,5 GtCO₂e pour le charbon, 11,5 GtCO₂e pour le pétrole et 7,3 GtCO₂e pour le gaz en 2019²³.

Les combustibles fossiles représentent plus de 80% des émissions de CO₂ et environ deux tiers des émissions de GES (voir chapitre 3).

LA BIOMASSE

Qu'est-ce que c'est ?

La biomasse est l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale, bactérienne ou fongique pouvant être transformée en chaleur, en électricité et biocarburants. Elle se présente sous forme solide, liquide ou gazeuse et a été, avec l'énergie solaire, la première ressource historique utilisée par l'Homme. Il s'agit des résidus forestiers (bois, sciure, écorce), des déchets ménagers ou industriels, des résidus agricoles (paille, arbres, fumier), des cultures agricoles spécifiques, (plantes sucrières, plantes oléagineuses) et autres types de résidus (graisses animales), des plantes dédiées à la culture énergétique (miscanthus géant, switchgrass, colza biodiesel). **Elle représente actuellement 10% de l'énergie consommée dans le monde.**²⁴



¹⁹IEA (2021), Oil 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/oil-2021>

²⁰Pétrole léger contenu dans des formations géologiques poreuses de faible perméabilité dont la production nécessite le recours à des procédés de fracturation hydraulique

²¹Source : IEA, World natural gas production by region, 1971-2020, IEA,

Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-natural-gas-production-by-region-1971-2020> All rights reserved.

²²Gaz contenu dans des formations géologiques poreuses de faible perméabilité dont la production nécessite le recours à des procédés de fracturation hydraulique .

²³Source : IEA, World natural gas production by region, 1971-2020, IEA,

Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-natural-gas-production-by-region-1971-2020> All rights reserved.

²⁴Source : IEA (International Energy Agency) (2021) Key World energy Statistics 2021, <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply>. All rights reserved.

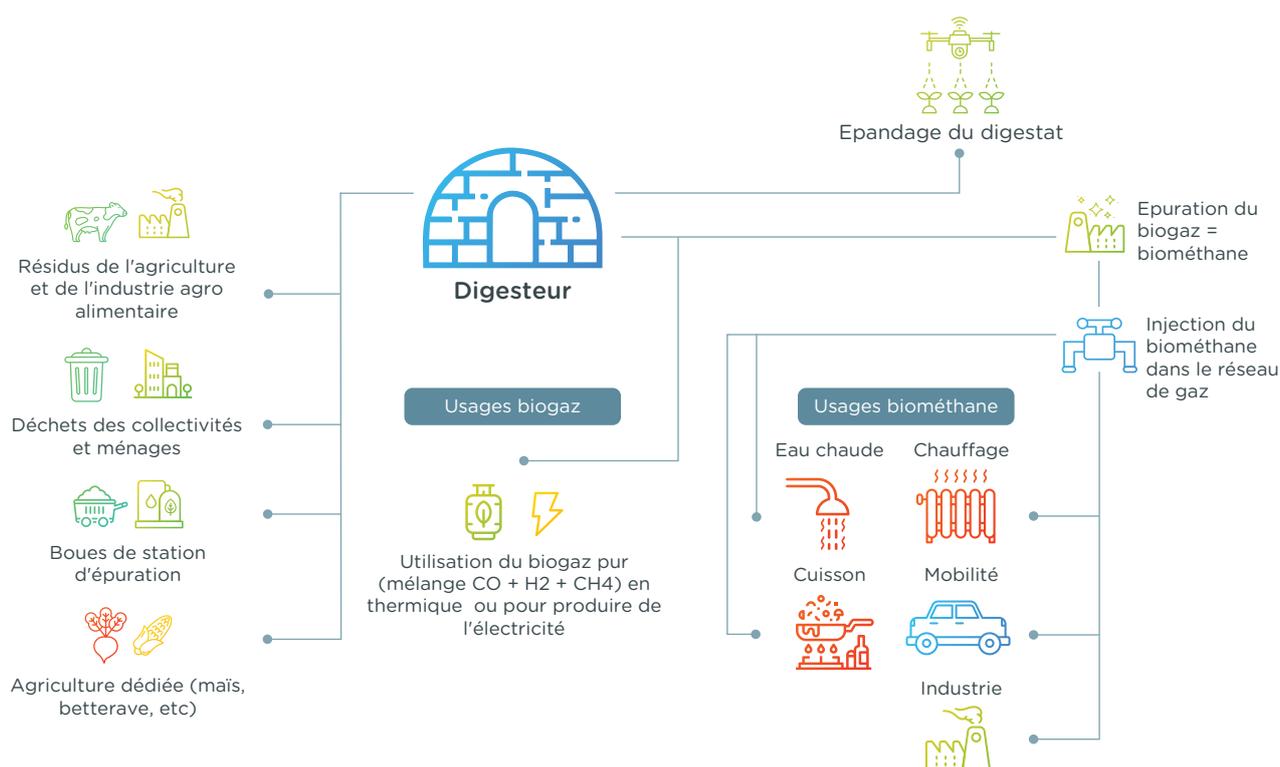


Figure 1.5 : Processus de production du biogaz et du biométhane

Source : Analyse Capgemini

Comment l'exploite-t-on ?

On distingue l'**usage traditionnel de la biomasse solide** qui consiste en la combustion de bois, feuilles, résidus agricoles et fumier pour des besoins de chauffage ou de cuisson domestique dans des équipements peu efficaces (foyers ouverts), **ressource clé de nombreux pays en développement**, de la **bioénergie moderne** qui fait référence à la **biomasse solide moderne** (pellets, plaquettes, buches dans des foyers fermés à meilleur rendement et centrales électriques), aux **biocarburants** liquides et au **biogaz**.

Parmi ces biocarburants, on distingue les **biocarburants conventionnels** (anciennement dits de première génération) et **avancés** (anciennement dits de deuxième, troisième génération).

Les **bioessences** conventionnelles sont aujourd'hui faites à partir du bioéthanol principalement produit à partir de la fermentation de sucres (betterave, canne à sucre) ou de l'amidon (blé, maïs, pomme de terre). En France en 2019, 7,9% de l'énergie contenue dans les essences était d'origine renouvelable²⁵.

Les **biodiesels** sont produits à partir d'huiles issues de plantes oléagineuses (colza, tournesol), de graisses animales ou d'huiles usagées et résiduelles.

Le **biogaz** est produit par la fermentation de matières organiques (déchets agricoles et ménagers). Il peut être brûlé sur son lieu de production pour obtenir chaleur et électricité, ou purifié pour obtenir du biométhane injectable sur le réseau de distribution de gaz naturel.

Les **biocarburants avancés** exploitent les matières cellulosiques non alimentaires (bois, feuilles et tiges des plantes) ou celles issues de déchets et plus récemment les capacités de génération d'huile ou d'hydrogène de certaines microalgues. Il s'agit d'un domaine de recherche prometteur car elles ne sont pas en concurrence avec l'utilisation agricole des sols à des fins alimentaires.

Où sont les ressources ?

La biomasse est disponible partout dans le monde en plus ou moins grandes quantités. Elle peut être exploitée en logique d'économie locale ou importée pour de grands volumes.

Si les biocarburants sont potentiellement productibles dans

²⁵<https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants>

de nombreuses régions du monde, seuls quelques pays ont à l'heure actuelle décidé d'en produire à l'échelle industrielle : Etats-Unis, Canada, Brésil, Argentine, Allemagne, France, Pays-Bas, Italie, Finlande, Suède, Chine, Indonésie, Thaïlande.

Quels sont les niveaux de production ?

La biomasse traditionnelle est une source d'énergie régulièrement oubliée dans les bilans car majoritairement non commerciale et donc difficilement mesurable. On estime pourtant qu'au début du XXI^e siècle, la biomasse traditionnelle fournit environ 1 Gtep par an, soit environ 10 % de la consommation mondiale d'énergie primaire. Mais localement, dans une grande partie de l'Afrique notamment, elle assure plus de 90 % de la consommation domestique²⁶. La production d'électricité à partir de biomasse a atteint en 2019 environ 665²⁷ TWh, soit pratiquement le double de la production de 2010 et le quadruple

par rapport à l'an 2000. Cela ne représente pour autant qu'un peu plus de 2% de l'électricité générée à l'échelle de la planète.

L'électricité produite à partir de la biomasse provient pour les deux tiers de la biomasse solide en 2018 et de la biomasse liquide et gazeuse pour le tiers restant.

Concernant la production de chaleur à partir de biomasse, elle était d'environ 800 000 TJ²⁸ en 2018, soit environ 7% de la production mondiale.

La production mondiale de biocarburants est passée d'environ 73 millions de barils en 2001 à environ 693 millions de barils en 2018²⁹, soit une progression de près de 1000% en 20 ans. Les Etats-Unis sont les premiers producteurs dans le monde avec 40% de la production mondiale, suivis par le Brésil (22%) et l'Indonésie (5%)³⁰. En comparaison, la production mondiale de carburants « essence » et « diesel » produits à partir de pétrole représentent

environ 34 milliards de barils.³¹

L'utilisation des terres cultivables pour les bioénergies implique une compétition avec l'industrie agroalimentaire et pourrait être responsable d'une hausse des cours des aliments ce qui ne serait pas acceptable. La biomasse n'est considérée comme énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. La biomasse générée annuellement de manière renouvelable, ne suffit pas à elle seule à compenser le recours aux ressources fossiles pour la consommation d'énergie mondiale.

Concernant le biogaz, sa production génère des résidus organiques appelés « digestats » qui sont considérés comme des déchets et soumis à des contraintes réglementaires d'exploitation, ces contraintes variant d'un pays à un autre. Par ailleurs les digestats contiennent des matières fertilisantes telles que l'azote, le potassium et le phosphore et peuvent être valorisés en tant qu'engrais. Leur valorisation est également soumise à de fortes contraintes réglementaires, ce qui limite le développement du marché.



²⁶<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differents-usages-du-bois-energie>.

²⁷Source : IEA - Net Zero by 2050 - A roadmap for the Global Energy Sector

https://iea.blob.core.windows.net/assets/beceb956-0dcf-4d73-89fe-1310e3046d68/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

²⁸IEA (International Energy Agency) (2020) Renewables 2020.

https://iea.blob.core.windows.net/assets/1a24f1fe-c971-4c25-964a-57d0f31eb97b/Renewables_2020-PDF.pdf All Rights reserved.

²⁹<https://fr.statista.com/statistiques/571267/biocarburants-production-mondiale-2000/>

³⁰<https://fr.statista.com/statistiques/571268/biocarburants-production-dans-les-principaux-pays-par-equivalent-petrole-en/>

³¹Source : IEA (International Energy Agency) – World Energy Balance 2020. All rights reserved. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>



LA GÉOTHERMIE

Qu'est-ce que c'est ?

La géothermie utilise le sous-sol pour produire de la chaleur, de l'électricité ou du froid. La chaleur vient du cœur de la Terre, en grande partie de la désintégration radioactive naturelle des atomes contenus dans les roches comme l'uranium, le thorium et le potassium, le reste provenant du reliquat de la chaleur de formation initiale de la Terre. Elle est indépendante des conditions climatologiques. Elle est toujours disponible.

La géothermie à très basse énergie, dite de surface (<30°C) exploite les premières dizaines de mètres, jusqu'à 200 m, pour des usages individuels avec utilisation de pompes à chaleur. Elle permet de chauffer et climatiser une maison individuelle ou un immeuble de bureaux ou de logements. Elle est disponible quasiment partout.

La géothermie profonde de moyenne température (30 à 130°C) va chercher

la ressource jusqu'à environ 2000 m. Elle fournit les besoins en chaleur pour des réseaux de chaleur urbains ou directement pour des industriels ou des serres agricoles. Elle est potentiellement disponible dans de nombreux endroits sur tous les continents, mais seulement 12,9 TWh de chaleur géothermique a été produite dans le monde en 2019³²(7,2 TWh en 2010).

Enfin la géothermie profonde à haute température, à partir de 150°C et jusqu'à 300°C permet de produire de l'électricité. Les forages concernés atteignent généralement plus de 1500 m de profondeur. Elle peut être modulée mais les gisements restent limités aux 70 pays volcaniques de la « Ceinture de feu » : Japon-Philippines-Indonésie, cordillère américaine du nord au sud, Antilles, Italie, rift africain. 92 TWh d'électricité a été produite en 2019 dans ces pays, soit moins de 2% de l'électricité produite à partir d'énergie renouvelable dans le monde et environ 0,3% de l'électricité totale générée dans le monde.

L'ÉLECTRICITÉ

Qu'est-ce que c'est ?

Depuis toujours les hommes ont pu observer des phénomènes électriques : la foudre ou les décharges provoquées par le frottement d'un tissu quand il fait froid et sec. D'ailleurs le mot électricité vient du mot grec « électron » qui signifie l'ambre car les grecs anciens³³ avaient observé qu'en frottant de l'ambre jaune, elle attirait des objets légers.

Comme pour les molécules d'eau soumises au champ gravitationnel, les électrons³⁴ s'écoulent quand ils sont soumis à un champ électrique. Ce courant électrique se mesure en Ampères.

L'analogie hydraulique de la tension électrique ou différence de potentiel est la différence de hauteur dans un cours d'eau. Elle se mesure en Volts.

La puissance électrique d'un barrage dépend de la hauteur de chute et du débit disponible. La quantité d'eau dans le barrage représente l'énergie disponible. Dans un circuit électrique, la puissance électrique (mesurée en Watts) est le produit de la différence de potentiel (tension) et de l'intensité du courant électrique.

Pour un barrage de puissance donnée, l'énergie produite est proportionnelle au temps durant lequel l'eau s'écoule. De façon générale l'énergie électrique est proportionnelle à la puissance et au temps pendant lequel l'électricité s'écoule. Elle se mesure en Watt-secondes ou avec un multiple le kWh³⁵.

³²<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables#data-browser>

³³Thalès de Millet en fait mention en 600 avant notre ère.

³⁴L'électron est l'un des composants des atomes (avec les protons et les neutrons)

³⁵Voir Chapitre 4 pour les unités de mesure.

L'électricité est transportée, distribuée et consommée principalement en courant alternatif

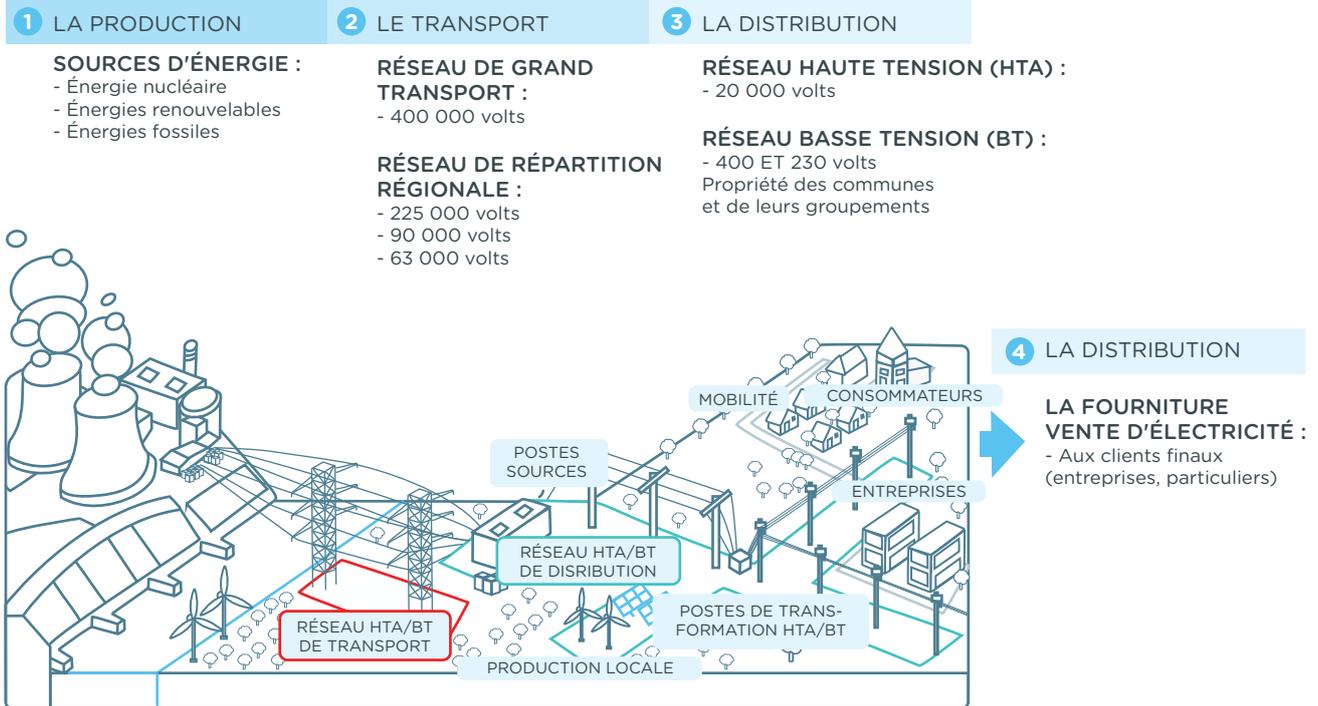


Figure 1.6 : L'origine de l'électricité
Source : EDF

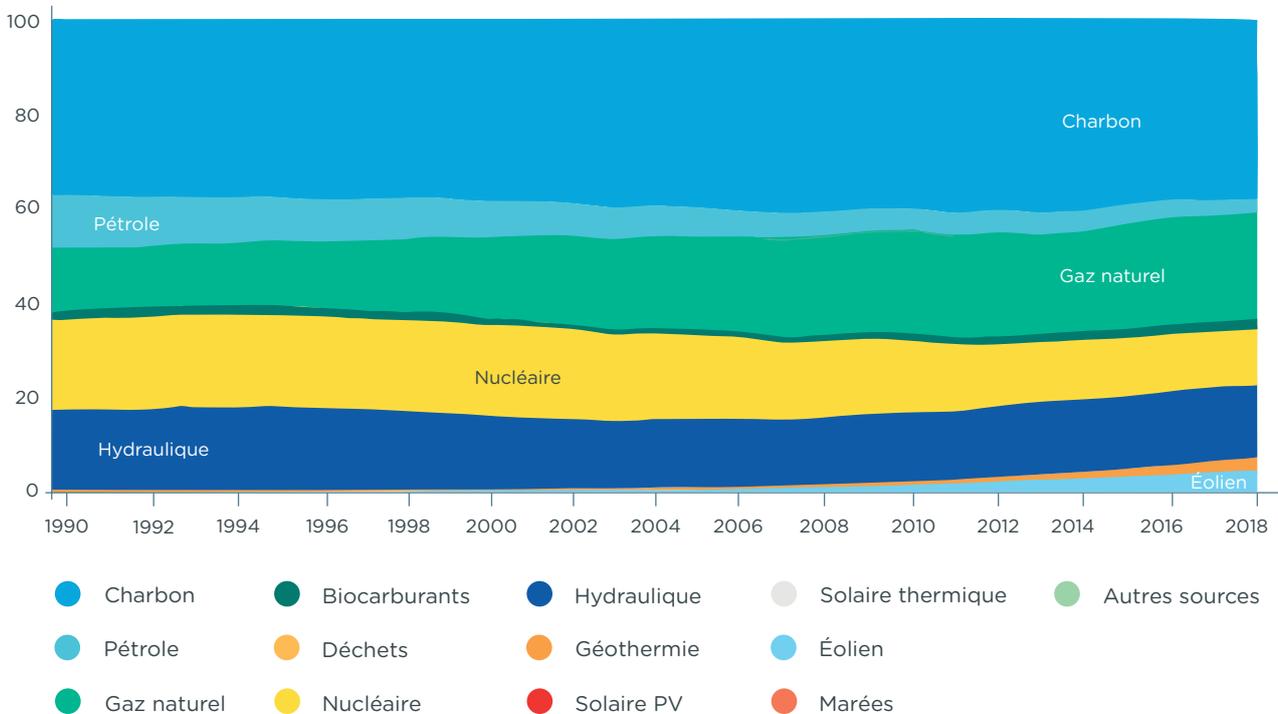


Figure 1.7 : Production d'électricité dans le monde par source (1990 – 2018)
Source : IEA (International Energy Agency) – World Energy Balance 2020. All rights reserved.
<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>

L'électricité est transportée sur des réseaux électriques qui sont constitués de fils conducteurs³⁶ en cuivre ou en aluminium. Elle est transportée en courant continu ou alternatif³⁷.

Comme l'électricité se stocke difficilement, il faut équilibrer à chaque instant la production d'électricité et sa consommation sous peine de voir le réseau s'effondrer et provoquer un black-out.

L'électricité est à la base de beaucoup d'usages apparus à partir du XIX^e siècle. On trouve de l'électricité pour l'éclairage, la consommation des appareils électroménagers et des ordinateurs, et de plus en plus pour des procédés industriels et pour les moyens de transports. Ainsi la consommation en électricité dans le monde en 2018 est plus de quatre fois plus importante qu'en 1974 (figure 1.7)

L'électricité peut être produite à partir de différentes sources d'énergie **primaires**. C'est une source d'énergie dite **secondaire ou vecteur électrique**.

Quels niveaux de production ?

En 2019, le volume d'électricité produit dans le monde était de 27 000 TWh, à partir de plusieurs sources d'énergie.

L'électricité d'origine fossile

Les énergies fossiles comme le charbon, le gaz, le pétrole dégagent

de la chaleur, lors de leur combustion, utilisée pour vaporiser de l'eau. Cette vapeur d'eau fait tourner une turbine qui va entraîner un alternateur et ainsi produire de l'électricité.

Aujourd'hui, elle représente environ 63% de l'électricité produite dans le monde³⁸.

L'électricité nucléaire

Aujourd'hui l'électricité nucléaire est produite par fission nucléaire, c'est-à-dire l'éclatement du noyau d'un atome d'uranium 235 pour produire plusieurs particules. Comme la somme des masses des particules produites est inférieure à la masse de l'atome d'uranium 235, il y a production d'énergie selon l'équation d'Einstein $E=MC^2$ ³⁹. Comme pour les centrales thermiques, la forte chaleur dégagée produit de la vapeur d'eau qui va faire tourner un alternateur.

L'uranium est très abondant sur terre et on en retrouve notamment dans l'eau de mer (avec une très faible concentration). L'immense majorité est inexploitable dans des conditions économiques car trop peu concentrée. 10 pays détiennent près de 90% des réserves d'uranium exploitables⁴⁰ (les plus importants étant l'Australie, le Kazakhstan, la Russie, le Canada, le Niger, la Namibie, l'Afrique du Sud). **C'est une énergie non renouvelable mais neutre en émissions de GES**. La production d'électricité à partir d'énergie nucléaire génère des déchets à différents degrés de radioactivité et à durées de vie plus ou moins longues. La gestion de ces déchets doit être rigoureuse avec des solutions adaptées à chaque degré

de dangerosité et fiables sur toute leur durée de radioactivité.

Aujourd'hui, elle représente environ 10% de l'électricité produite dans le monde.

L'électricité hydraulique

L'eau mise en mouvement, soit par différence de hauteur (centrales adossées à des barrages ou des écluses), soit naturellement (centrales au fil de l'eau), va entraîner la turbine d'un alternateur pour produire de l'électricité. Dans le premier cas, on utilise l'énergie potentielle, dans le second l'énergie cinétique.

La production des barrages classiques était de 4 305 TWh en 2019 et le potentiel théorique de 17 325 TWh⁴¹. Cependant son potentiel de développement se heurte au fort impact sur les déplacements de population.

Aujourd'hui, elle représente environ 16% de l'électricité produite dans le monde.

L'électricité éolienne

L'énergie du vent provient indirectement de l'énergie solaire, quand différents endroits sur Terre sont réchauffés de manière différente. Très tôt l'homme a utilisé cette énergie avec des moulins à vent pour produire de la farine. C'est le mouvement de l'air qui fait tourner les pales de l'éolienne (énergie cinétique) pour entraîner une turbine. Plus le vent est fort et constant, plus les éoliennes produisent de l'électricité. A présent, on construit des éoliennes

³⁶Un bon conducteur électrique oppose peu de résistance au passage du courant.

³⁷En courant continu le flux des électrons s'écoule toujours dans le même sens. En courant alternatif les électrons circulent alternativement dans les deux sens du circuit (ils font un mouvement de va et vient)

³⁸Source : IEA (International Energy Agency) – World Energy Balance 2020. All rights reserved. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>

³⁹C représente la vitesse de la lumière.

⁴⁰Pays avec les plus grandes ressources : l'Australie, le Kazakhstan, la Russie, le Canada, le Niger, la Namibie, l'Afrique du Sud.

⁴¹Global resource potential of seasonal pumped hydropower storage for energy and water storage, 2020.

en mer afin de chercher de meilleures ressources en vent.

Source décarbonée, renouvelable, intermittente, on estime que 900 TW d'énergie solaire reçus sont convertis en énergie éolienne, dont **une faible partie serait récupérable**. La puissance installée mondiale a atteint fin 2020, 743 GW⁴². Un rapport de l'International Energy Agency (IEA) publié en 2019 évoque un potentiel de 420 000 TWh par an dans le monde, soit ni plus ni moins que **18 fois la demande mondiale en électricité**.

Aujourd'hui, elle représente environ 5% de l'électricité produite dans le monde.

L'électricité solaire⁴³

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement solaire, lui-même trouvant son origine dans les réactions de **fusion nucléaire** intervenant **au cœur du soleil**. Il existe deux technologies pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire :

- Le photovoltaïque utilise des cellules composées de semi-conducteurs qui émettent des électrons sous l'effet de la lumière. C'est la forme la plus répandue.
- Le solaire thermodynamique à concentration passe par le chauffage à très haute température à l'aide de miroirs concentrateurs d'un fluide, qui va produire de l'électricité via une turbine à vapeur.



On pourra également mentionner l'utilisation de l'énergie solaire de manière passive et directe pour le chauffage et éclairage des bâtiments et pour générer de la chaleur à travers des capteurs thermiques absorbant le rayonnement pour chauffer l'eau chaude sanitaire ou un système de chauffage. Énergie inépuisable, disponible et n'émettant pas de GES, elle est présente partout à la surface de la planète, **l'énergie solaire fournit toutes les 50 minutes de quoi répondre à la consommation annuelle des habitants de la Planète.**

Elle représente environ 2% de l'électricité produite dans le monde.

L'électricité d'origine biomasse et déchets

La combustion de biomasse ou l'incinération de déchets permet de produire de la vapeur et de faire tourner des alternateurs qui génèrent de l'électricité.

Elle représente 2% de l'électricité produite dans le monde, soient 637 TWh⁴⁴.

L'électricité marine

On distingue l'énergie des vagues qui peut être captée par des technologies houlomotrices, l'énergie des courants marins captée par des hydroliennes et celle des marées captée dans les usines marémotrices (barrage construit sur un estuaire laissant passer 2 fois par jours les eaux montantes et descendantes) qui font tourner une turbine immergée en mer. La production actuelle est faible puisqu'elle était de 1 TWh en 2019.

Le potentiel mondial de l'énergie des marées est estimé entre 8000 et 80 000 TWh/an. Néanmoins, seuls 535 MW de puissance étaient installés fin 2019. En effet, malgré un potentiel important, il n'est toujours pas possible de faire des économies d'échelle significatives et ainsi de faire diminuer les coûts des projets.

Source d'énergie renouvelable, décarbonée, elle représente environ 0,00004% de l'électricité produite dans le monde.

⁴²Source : GWEC Global Wind Report 2021 - All rights reserved. <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>

⁴³Source : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiches-pedagogiques-energies>

⁴⁴Global Bioenergy Statistics 2020, World Bioenergy Association, <http://www.worldbioenergy.org/uploads/201210%20WBA%20GBS%202020.pdf>. All rights reserved

L'HYDROGÈNE

Qu'est-ce que c'est ?

L'hydrogène est le plus petit atome de l'univers et le plus léger. Lorsqu'il est brûlé pour produire de l'énergie, il n'émet que de la vapeur d'eau. Il n'existe quasiment pas à l'état naturel sur Terre et doit être produit à partir d'autres énergies existantes. On le qualifie de « vecteur énergétique » au même titre que l'électricité.

L'hydrogène peut être utilisé sous ses formes liquide (-253°C à 1 bar), gazeuse à pression normale, ou gazeuse comprimée à fortes pressions (300 à 700 bars⁴⁵) et être stocké dans des supports solides.

L'hydrogène était présent dans les réseaux de gaz de ville (CO + H₂) du XIX^e siècle jusque dans les années 1970. Ce gaz a été exclu des réseaux à cause de sa toxicité et remplacé par le gaz naturel.

Une solution de stockage de l'électricité

Dans le système électrique, au pied des installations de productions renouvelables intermittentes, l'hydrogène permet d'avoir une solution de stockage jusqu'à plusieurs jours, (plus longue que les batteries mais plus courte que le stockage hydraulique) à partir de l'électricité excédentaire qui est ensuite restituée avec une pile à combustible (PAC - les *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, *PEMF*, à basse température et les *Solid Oxide Fuel Cell*, *SOFC*, à haute température). On peut aussi transporter l'hydrogène produit vers les installations industrielles. Dans les bâtiments, l'hydrogène utilisé dans des piles à combustible permet de produire la chaleur et l'électricité.

Où sont les ressources ?

L'hydrogène est l'atome le plus présent à la surface de la Terre sous forme d'eau (H₂O) et de composés organiques, mais pas sous sa forme de molécule H₂. Elle est donc en théorie disponible partout dans le monde mais pas sous forme de gisements directement exploitables.

Quels niveaux de production ?

Aujourd'hui l'hydrogène industriel est produit à 72% à partir de gaz naturel (par procédé de vaporeformage ou reformage à la vapeur, en anglais : *Steam Methane Reforming* ou *SMR*⁴⁶), et 28% à partir de charbon⁴⁷(procédé *ATR*⁴⁸). C'est ce qu'on appelle l'hydrogène gris dont la production est fortement émettrice de CO₂. Ainsi les 74 millions de tonnes d'hydrogène produites chaque année dans le monde génèrent 630 millions de tonnes de

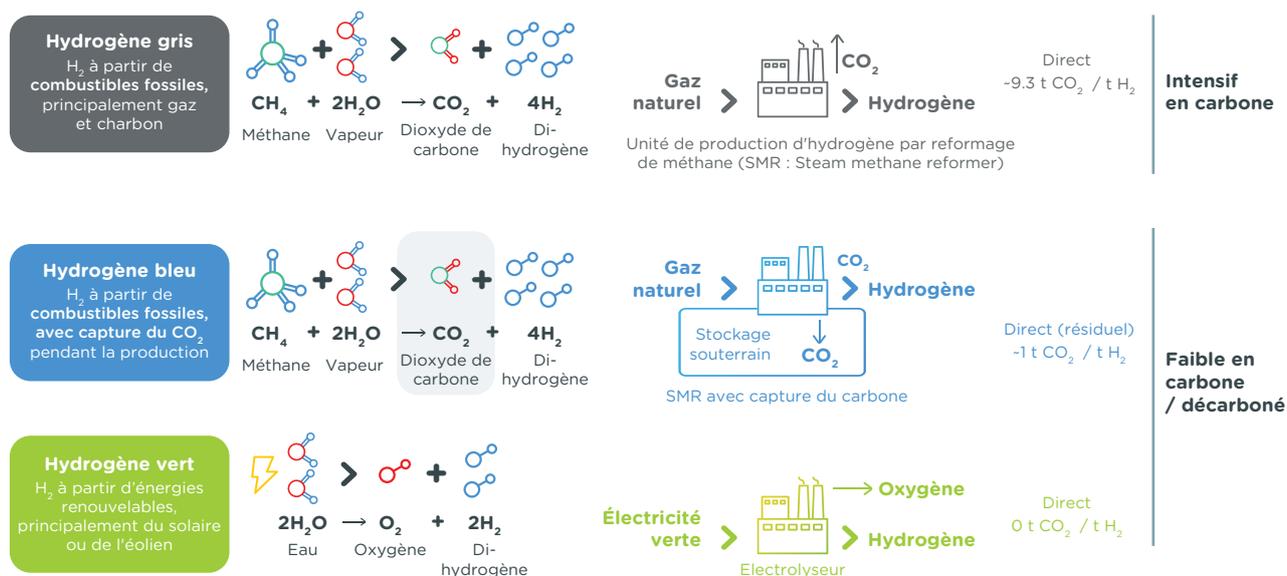


Figure 1.8 : Les différents types d'hydrogène
Source : Analyse Capgemini

⁴⁵La pression atmosphérique (celle que nous subissons en permanence) est d'un bar
⁴⁶<https://www.engineering-airliquide.com/steam-methane-reforming-syngas-production>.
⁴⁷Et 2% par électrolyse de l'eau
⁴⁸ATR : autothermal reforming (reformage autothermique)



CO₂, soit l'équivalent de l'ensemble du transport aérien mondial.

Comme pour l'électricité, un des enjeux est de produire un hydrogène décarboné à prix compétitif et disponible facilement. On distingue deux façons de produire de l'hydrogène décarboné :

- La voie, dite d'hydrogène bleu consiste à décarboner les procédés SMR et ATR en capturant et en stockant le CO₂. Cela suppose d'avoir recours au CCS,⁴⁹
- La voie dite d'hydrogène vert consiste à produire l'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité décarbonée, donc provenant de sources d'énergie renouvelables. Cela suppose des progrès en matière d'électrolyseurs (coûts, rendements).

Assurer la totalité de la production d'hydrogène actuel (70 millions de tonnes équivalent à 2 310 TWh d'après l'AIE) par électrolyse supposerait d'y consacrer l'équivalent en ordre de grandeur de toutes les capacités électriques européennes actuelles. Développer fortement l'hydrogène vert nécessite de développer des surfaces nouvelles très importantes de parcs éoliens ou photovoltaïques à coût compétitif (typiquement de l'éolien marin ou du solaire photovoltaïque en zone désertique), et de créer les infrastructures de transport requises.

On notera également les autres modes de production de l'hydrogène : brun et noir lorsque les procédés SMR sont faits à partir d'un gaz synthétique généré à partir de charbon, turquoise une variante du

bleu avec pyrolyse et captage du CO₂ sous forme solide, rose quand l'électrolyse est faite à partir d'électricité nucléaire et enfin jaune quand l'électrolyse est faite à partir d'électricité prélevée sur le réseau.

L'hydrogène renouvelable généré par l'utilisation d'énergie décarbonée peut être conservé en tant que tel, ou bien être utilisé pour la production de e-carburants (e-fuels ou electrofuels). Dans ce cas, il est combiné à une source de CO₂ pour produire des carburants de type méthane, méthanol, ou combiné à de l'azote pour produire de l'ammoniac. Selon les cas, ces différents e-carburants peuvent être utilisés dans des piles à combustibles couplés à une motorisation électrique, ou dans des moteurs à combustion interne.

⁴⁹Dispositif de captage et de stockage du dioxyde de carbone (Carbon Capture and Storage en anglais)

1.3

Les grands enjeux de l'offre d'énergie

ACCÉLÉRER LA MATURITÉ TECHNOLOGIQUE DES ÉNERGIES

Les technologies qui permettent de produire de l'énergie n'en sont pas toutes au même niveau de maturité. Ainsi, la modification de la répartition du mix énergétique n'est pas uniquement une affaire de volonté mais dépend également largement de la maturité industrielle dans laquelle se trouve la technologie concernée. Cela va en effet avoir un impact fort sur son coût et sur sa capacité à être déployée largement (voir graphique ci-après).



Figure 1.9 : Panorama des technologies énergétiques bas-carbone selon leur maturité technologique

Source : Analyse Capgemini

A noter : TRL est un indice de maturité technologique utilisé par la NASA « Technology Readiness Level »



AMÉLIORER LE RENDEMENT

L'industrie de l'énergie connaît de rapides progrès technologiques à la fois sur l'efficacité des solutions et sur les réductions de coûts :

L'industrie éolienne

Les gains de compétitivité sont liés à des turbines plus grandes, qui captent mieux les différents régimes de vent. Les matériaux composites permettent d'alléger le poids des pales. Les facteurs de charge⁵⁰ des éoliennes terrestres devraient augmenter en moyenne de 34% en 2018 à 40% en 2030 et celles des éoliennes en mer de 43% en 2018 à plus de 50% en 2030.⁵¹

Enfin, l'utilisation de plateformes flottantes facilite l'installation des éoliennes en mer et fait baisser les coûts (pas dans la phase de démarrage).

Le coût de l'électricité éolienne terrestre a décliné de 8% par an depuis 10 ans et celui de l'éolien en mer devrait être divisé par deux d'ici 2030 selon l'IRENA.

L'industrie photovoltaïque

Elle a connu depuis 10 ans des progrès fulgurants grâce à l'amélioration des rendements des cellules photovoltaïques et à l'industrialisation de leur production, ce qui a permis de baisser les coûts de manière spectaculaire de 18% par an en moyenne.

La baisse des coûts par kWh futurs viendra notamment de l'augmentation des rendements, grâce à la recherche et au développement de plusieurs technologies, les technologies dites à « couches minces » ou hétérojonction et les cellules à pérovskite.⁵²

Les centrales à combustible fossiles

- Les progrès technologiques obtenus ces dernières années, permettent d'améliorer l'efficacité énergétique (exprimée par le rendement) et de diminuer les pertes d'énergie de ces centrales. Leur rendement est en moyenne d'environ 35% pour les centrales à charbon et de 50% pour les centrales à gaz.

⁵⁰Le facteur de charge exprimé en % est le ratio entre la production réelle et la production maximum théorique (ou encore la production réelle divisée par la puissance nominale fois 8760 heures).

⁵¹L'Observatoire Mondial des Marchés de l'Énergie 2020, Capgemini : <https://www.capgemini.com/fr-fr/etudes/wemo2020/>

⁵²<https://www.pv-tech.org/oxford-pv-pushes-tandem-shj-perovskite-cell-conversion-efficiency-to-record-29-52/>



- **Charbon** : plusieurs technologies permettent d'améliorer le rendement des centrales aux alentours de 45% : centrales « ultra-supercritiques » qui opèrent à des très hautes températures ; gazéification du charbon (*Integrated Gasification Combined Cycle*) permettant de combiner plus facilement charbon et biomasse ; lit fluidisé circulant avec des températures plus basses (800-900°C), limitant les polluants.
- **Gaz** : les équipementiers continuent d'améliorer la conception des turbines et les centrales à gaz à cycle combiné affichent des rendements supérieurs à 60%. Pour faire face aux évolutions des marchés électriques, les centrales à gaz doivent être de plus en plus réactives pour fournir de l'électricité, ce qui encourage le développement de turbines

aérodérivatives permettant de démarrer en quelques minutes.

La production d'hydrogène

Elle voit apparaître trois types d'innovation pour améliorer à terme le rendement de la production :

- L'amélioration des technologies d'électrolyse parmi lesquelles les procédés les plus éprouvés sont celui d'électrolyseur alcalin et l'électrolyseur par membrane à échange de protons (PEM)⁵³. La technologie à oxydes solides à haute température est prédite d'apporter un gain significatif de rendement⁵⁴ mais qui est encore au stade de pilote,
- Le *solar-to-hydrogen* (STH) qui permet de produire de l'hydrogène, directement à partir d'eau et de lumière, en utilisant des panneaux associant photo-électrodes et électro-catalyseurs à base de nanomatériaux,⁵⁵
- L'intégration de l'électrolyseur directement dans la turbine sur certaines éoliennes. Cette méthode permet d'améliorer le rendement grâce à la suppression d'une étape de production.⁵⁶

⁵³Source : IEA (International Energy Agency) – The future of Hydrogen. All rights reserved. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

⁵⁴Communiqué de presse du CEA « Un rendement de 90 % est atteint sur un système d'électrolyse du CEA » - publié le 4/12/2012

⁵⁵<https://www.usinenouvelle.com/editorial/un-electrolyseur-photovoltaïque-testé-par-engie-au-crigen.N1008349>

⁵⁶<https://www.usinenouvelle.com/editorial/idee-verte-produire-de-l-hydrogene-vert-en-mer-au-pied-des-eoliennes.N1049024>

AMÉLIORER LE STOCKAGE

Les électricités éolienne et solaire ne sont disponibles que lorsqu'il y a du vent ou du soleil. Elles sont intermittentes. Or il faut à chaque instant équilibrer sur le réseau électrique la demande avec la production. Pour exploiter le réseau électrique de façon sûre, il est donc nécessaire d'associer aux énergies renouvelables intermittentes du stockage d'électricité qui permet de fournir de l'électricité en l'absence de vent ou de soleil.

- Le stockage le plus important est apporté par les barrages hydrauliques à deux niveaux appelés STEPs⁵⁷. Dans ces

barrages, on pompe l'eau du niveau le plus bas vers le niveau plus haut. Elle est ainsi stockée et peut être turbinée pour produire de l'électricité quand c'est nécessaire.

- Indispensables au développement des véhicules électriques mais utiles aussi dans les usages stationnaires, les batteries électriques qui permettent de stocker quelques heures de production d'électricité ont fait des progrès impressionnants ces dernières années. La course à la construction d'usines toujours de plus grandes tailles – « les gigafactories » – a permis des réductions spectaculaires de coût. Ainsi le coût d'une batterie lithium-ion a déjà diminué de plus de 80% entre 2012 et 2020⁵⁸.
- L'hydrogène est une solution pour stocker l'électricité générée en

surplus et la convoier vers les lieux de consommation.

Les recherches se poursuivent pour améliorer la performance des batteries (notamment leur densité énergétique), leur sécurité et diminuer leur dépendance aux matières premières rares.

Disposer de stockage à bon coût, en grande quantité, en veillant à un usage raisonné des minerais et la gestion des effets environnementaux permettra d'augmenter la part d'énergies renouvelables intermittentes.



⁵⁷STEP : Stations de Transfert d'Énergie par Pompage

⁵⁸<https://ieefa.org/battery-storage-costs-expected-to-hit-key-cost-reduction-target-by-2023-ihs-markit/>

INNOVER DANS LE NUCLEAIRE

La recherche dans ce domaine se concentre sur plusieurs enjeux. Il s'agit d'augmenter la sûreté des réacteurs en intégrant les retours d'expérience des accidents passés, améliorer la sécurité d'exploitation et de réduire les déchets radioactifs. D'autres recherches portent sur de plus petits réacteurs modulaires et donc plus flexibles.

Les grands réacteurs de génération 3 (1000 à 1600 MW) de type EPR (*Evolutionary Power Reactor*) présentent une sûreté améliorée. Leur taille importante permet de bénéficier d'effets d'échelle. Cependant ils s'avèrent difficiles à construire et leur compétitivité en est impactée négativement.

Ces dernières années, l'intérêt pour les réacteurs de petites tailles modulaires (en anglais *Small Modular Reactor - SMR*) a augmenté. Ces SMRs devraient avoir une performance de sûreté améliorée grâce à des dispositifs de sécurité passive. Ils nécessitent un investissement initial plus faible et devraient être plus faciles à construire. Cependant, ils occupent beaucoup plus de surface par unité d'électricité produite et ne bénéficient pas d'effet d'échelle.

Dans le futur, ces deux types de réacteurs devraient cohabiter.

Maîtriser la technologie de la réaction de fusion plutôt que celle de fission, pour produire de l'électricité, représenterait la plus grande innovation de l'énergie nucléaire (physiquement sûr, sans production de CO₂, sans déchet et sans risque de prolifération selon la SFEN). C'est



l'objectif du projet international ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) rassemblant 35 pays, la plupart des puissances nucléaires, mais dont la réalisation ne devrait pas arriver avant 2050.

EXPLOITER LE NUMERIQUE POUR OPTIMISER PRODUCTION ET CONSOMMATION

L'usage de la donnée et les outils numériques accélèrent les progrès technologiques.

Voici quelques exemples appliqués au réseau électrique :

1. Les réseaux électriques sur lesquels circulent non seulement des électrons mais de plus en plus d'information permettant aux opérateurs de mieux équilibrer la consommation (la demande) avec l'offre de production notamment avec la part croissance d'intermittence. On parle de réseaux (plus) intelligents (Smart Grid) avec des outils liés à la consommation

(compteurs intelligents),

2. Les jumeaux numériques⁵⁹ facilitent la construction et l'exploitation des centrales électriques, (notamment leur maintenance) - modèle numérique d'une installation de production qui permet de tester et d'anticiper les problèmes, les risques de panne et les solutions et donc d'augmenter les rendements,
3. L'automatisation du pilotage des centrales à combustibles fossiles, réduit le coût de la maintenance,
4. Les capteurs connectés sur les éoliennes permettent de mieux comprendre les vents et mieux en tirer parti,
5. Les prévisions météorologiques plus granulaires et plus précises, grâce à l'intelligence artificielle, améliorent la prévision de la production électrique d'origine éolienne et solaire,
6. La surveillance par drones des lignes électriques permet de détecter plus vite et mieux les points de défaillance.

⁵⁹Un jumeau numérique est une réplique numérique des équipements de la centrale et du processus d'exploitation

1.4

Conclusion

L'homme a toujours eu besoin d'énergie pour assurer sa subsistance et son développement et s'est toujours dirigé vers les énergies les plus efficaces pour y parvenir. Cela s'est depuis longtemps caractérisé principalement par la recherche d'une énergie disponible, abordable et fiable et, depuis plusieurs années maintenant, la recherche d'une énergie durable, c'est-à-dire la moins carbonée possible. La combinaison de tous ces facteurs est difficile et nécessite des compromis.

À partir des sources d'énergie offertes par la nature et qui ont servi aux premiers hommes, ceux-ci ont développé de nouveaux vecteurs énergétiques. Les principales sources d'énergie sont les énergies fossiles, l'uranium, mais aussi le soleil, le vent, les mouvements de l'eau, la géothermie et la biomasse. Elles permettent à l'Homme d'assurer sa survie mais aussi d'améliorer ses conditions de vie de manière significative.

L'énergie mondiale est actuellement produite à 80% à partir d'énergies fossiles qui sont fortement émettrices de GES. Afin d'atteindre la neutralité carbone, de profonds changements seront donc nécessaires dans les décennies à venir pour produire une énergie de moins en moins carbonée. D'autres changements seront par ailleurs nécessaires concernant les habitudes de consommation afin de se diriger vers des énergies moins carbonées et améliorer l'efficacité énergétique. Nous examinerons ces sujets dans les chapitres suivants.





2

La demande d'énergie

Depuis le XVIII^e siècle, l'homme a connu une formidable amélioration de ses conditions de vie matérielle grâce à l'abondance des énergies fossiles, mais avec pour conséquence l'augmentation des émissions de GES dans l'atmosphère.

L'énergie doit rester un service fiable, abordable et accessible à tous, mais dans un souci de préserver la planète face au défi du changement climatique, il est nécessaire de diversifier les énergies et de se diriger vers de nouveaux modes de consommation pour réduire massivement les émissions de GES. D'une société industrielle répondant vers ses besoins principalement avec les énergies fossiles, l'humanité est en train de passer à un ensemble plus varié de sources d'énergies plus respectueux de la planète, mais qui demande une plus grande adéquation entre énergies et usages, entre offre et demande.

Dans un système où le nombre et le type d'énergies seront beaucoup plus variés, il faudra associer de façon optimale chaque usage avec chaque type d'énergie en prenant en compte la façon de la transporter jusqu'au client final.

2.1

Quelles énergies
pour quels
usages ?



LES TYPES D'ÉNERGIE SELON LEUR DEGRÉ DE TRANSFORMATION ET LEUR PRATICITÉ

L'énergie que nous utilisons a subi des transformations plus ou moins importantes. C'est pour cela que l'on distingue énergie primaire, énergie secondaire et vecteur énergétique, énergie finale et énergie utile.

De plus il faut en général⁶⁰ transporter ces énergies jusqu'à l'utilisateur final, par transport terrestre ou maritime, en construisant des réseaux plus ou moins complexes (oléoducs, gazoducs, réseaux de chaleur et de froid ou réseaux électriques) complétés par d'autres moyens logistiques (camions, trains, navires). Le système énergétique

actuel repose ainsi sur un vaste parc d'infrastructures et d'équipements dont l'évolution est l'un des enjeux à prendre en compte dans la transition énergétique. Les énergies se stockent plus ou moins bien, ce qui impose certaines contraintes. En particulier la difficulté de stockage de l'électricité rend l'exploitation des réseaux électriques complexe car il faut à chaque instant équilibrer la demande d'électricité et sa production.

L'énergie primaire

C'est l'énergie non transformée telle qu'on la trouve dans la nature au moment de son extraction : charbon, pétrole, gaz, biomasse, chaleur de la terre, vent, mouvement des eaux, rayonnement du soleil.

Les énergies primaires peuvent être utilisées et commercialisées sans transformation (charbon, gaz, biomasse) ou avec une transformation légère qui conserve la même forme liquide ou gazeuse et engendre au maximum 10% à 20% de pertes (carburants et combustibles tirés du pétrole, combustibles gazeux).

Les vecteurs énergétiques

Ils correspondent à l'inverse à des **énergies profondément transformées** dans leur nature. Les principaux vecteurs sont l'électricité, les réseaux de chaleur et de froid, et bientôt l'hydrogène et les carburants et gaz de synthèse. Ils sont produits à partir d'énergies primaires en une ou en plusieurs étapes. Le nombre de

⁶⁰Sauf dans le cas d'utilisation très locale comme la biomasse, le solaire utilisé pour l'eau chaude sanitaire, le solaire photovoltaïque qui peut être produit et utilisé localement

ces étapes est un facteur clé (coûts, rendements).

Les vecteurs sont utiles pour au moins trois raisons. Une fois les infrastructures construites, ils sont plus faciles à transporter et à commercialiser en énergie finale. Ils sont plus faciles à utiliser dans les équipements qui produisent l'énergie utile à nos besoins (appareils de chauffage, moteurs, lampes, matériel électronique, véhicules). Enfin, ils donnent de la souplesse au système énergétique d'un pays en permettant d'utiliser plusieurs sources d'énergies primaires.

Les vecteurs énergétiques ont un inconvénient : dans cette transformation des quantités importantes d'énergie sont perdues notamment sous forme de chaleur, qui n'est en général pas réutilisée.

L'énergie finale

C'est l'énergie qui est commercialisée et distribuée auprès des clients finaux. L'énergie finale est commercialisée auprès de quatre secteurs principaux : résidentiel, commercial, industriel, transports.

L'énergie utile

C'est l'énergie produite à travers un équipement utilisé par le consommateur (chaudière, pompe à chaleur, éclairage, cuisinière, équipements industriels, moteurs, véhicules...) à partir de l'énergie finale achetée. Cette étape supplémentaire de transformation pour servir un besoin introduit aussi des pertes d'énergie sous forme de chaleur.

La consommation d'énergie utile est égale à la production d'énergie primaire diminuée de toutes les

pertes de transformation et de transport sur le long de la chaîne de distribution puis chez le client dans son équipement.

Prenons un exemple : une lampe à incandescence alimentée à partir d'une centrale à gaz : le rendement de la centrale est de 33%, la perte lors du transport sur le réseau est de 5%, le consommateur recevra 95% de l'énergie transportée. Lors de l'utilisation de l'ampoule, 35% de l'énergie servira à produire de la lumière, les 65% restants de la chaleur non désirée. Le rendement total pour s'éclairer est donc de $33\% * 95\% * 35\% = 10\%$. Neuf dixièmes de l'énergie primaire a été perdue dans le processus.

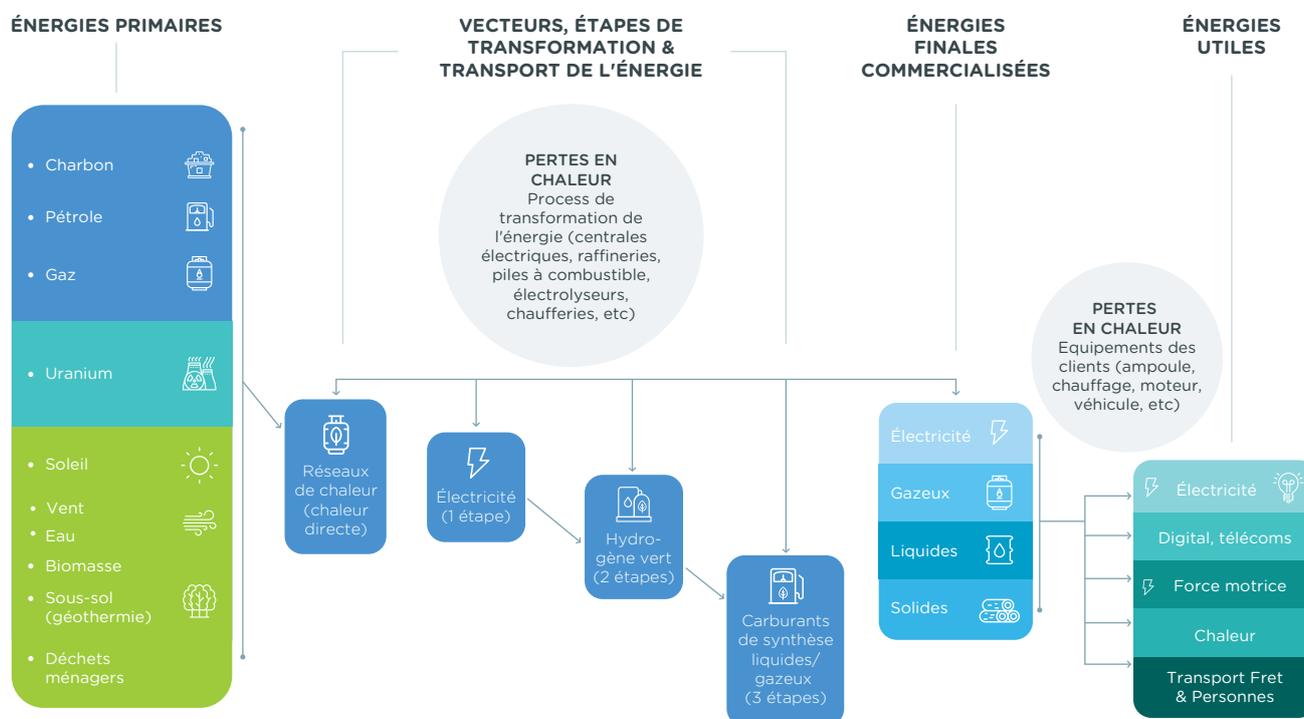


Figure 2.1 : Etapes de transformation des énergies et pertes associées
Source : Analyse Capgemini



LA LOGISTIQUE DE TRANSPORT, DISTRIBUTION ET STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Cette section présente les avantages et les inconvénients des différentes formes d'énergies en termes de transport, de leur distribution aux usagers finaux, de leur stockage.

Formes solides

Les formes solides sont des énergies primaires ne nécessitant pas de transformation : charbon, biomasse solide comme le bois, les pailles. Elles se stockent et se transportent bien sur des plateformes ou des contenants de grande capacité.

Les modes de transport typiques sont :

- Transport à grande capacité à échelle internationale ou nationale ou jusque chez de gros sites industriels : navires vraquiers, trains.

- Distribution locale jusqu'au client final : route par camions.

Formes liquides

Les formes liquides sont les plus denses en énergie par unité de volume. Elles constituent l'énergie la plus facilement stockable : dans des cuves de tailles très variées ainsi que dans des réservoirs mobiles pour les véhicules. Les liquides sont facilement transférables par gravité ou par pompage d'un mode de transport ou de stockage à un autre.

Les modes de transport typiques sont :

- Transport internationaux, nationaux et jusque chez de très gros clients : navires (tankers), oléoducs, trains ou camions.
- Distribution locale jusqu'au client final : route par camions citernes.

Forme électricité

L'électricité requiert une infrastructure qui présente l'avantage de transporter et de distribuer l'énergie de façon continue, propre et silencieuse depuis la centrale électrique jusqu'au dernier appareil chez le client : le réseau électrique. L'électricité sert de nombreux usages, dont certains lui sont spécifiques (l'éclairage, tous les appareils digitaux).

Elle se transporte aisément jusqu'à quelques milliers de kilomètres en courant alternatif⁶¹. Pour la transporter en souterrain ou sous-marin, on utilise surtout le courant continu. Actuellement les distances maximums sont de quelques centaines de kilomètres mais elles vont augmenter. L'électricité se stocke mal et peu au regard des volumes utilisés, les solutions incluent : des stations de pompage hydraulique (très efficaces), des batteries coûteuses et aux capacités limitées, la transformation en hydrogène mais avec un rendement très faible (voir chapitre 1).

⁶¹<https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/comprendre-le-marche-de-l-energie/comprendre-la-difference-entre-courant-alternatif-et-courant-continu>

Le transport de bout en bout de l'électricité inclut :

- Transport à grande capacité à échelle internationale ou nationale ou jusqu'à de gros sites industriels : réseau de transport haute tension (plusieurs centaines de milliers de volts).
- Distribution locale jusqu'au client final : réseau de distribution moyenne tension (plusieurs dizaines de milliers de volts) puis réseau basse tension et circuits électriques chez le client (380 volts, 220 volts, 110 volts selon les régions et les usages), ainsi que réseaux de télécommunications téléphone et informatique (quelques volts).

Forme chaleur ou froid

La chaleur ou le froid se transportent sous forme de réseaux d'eau réchauffée (ou vapeur) ou refroidie, sur de courtes distances à l'échelle d'une ville, d'un quartier ou d'une zone industrielle.

Formes gazeuses (parfois liquides à certaines étapes de leur parcours)

Les principales formes gazeuses d'énergies incluent le gaz naturel purifié, les gaz pétroliers de type propane et butane, le biogaz, le biométhane, l'hydrogène.

L'acheminement par canalisation fait du gaz une énergie de réseau pratique d'utilisation comme l'électricité. Les gaz présentent en revanche un risque lié à leur explosivité en cas de fuite et de mélange avec l'oxygène de l'air en milieu fermé mais les standards de sécurité des équipements permettent d'y remédier.



La faible densité d'énergie par unité de volume des gaz impose de les densifier, en les comprimant ou en les refroidissant, et cela d'autant plus que le gaz est léger, afin de les transporter par véhicules maritimes ou terrestres ou dans des bouteilles.

Les gaz ont une stockabilité intermédiaire entre celle des liquides et de l'électricité. Le gaz naturel se stocke plusieurs mois dans des structures géologiques poreuses pendant l'été, ce qui permet de couvrir l'excédent de demande d'hiver pour le chauffage, ou sous forme de bouteilles et citernes chez les usagers.

Les modes de transport typiques pour le gaz sont :

- Transport à grande capacité international et national ou jusque chez de gros clients : navires de transport (GNL: gaz naturel liquéfié à des températures de -162°C), gazoducs, réseau de transport de gaz national (plusieurs dizaines de fois la pression atmosphérique ou « bars »).
- Distribution locale jusqu'au client final : réseau de distribution local (quelques bars) puis jusqu'au

compteur puis canalisation chez le client jusqu'à la gazinière ou la chaudière ; trains et camions citernes (liquide ou haute pression) ; bouteilles de gaz transportées par route (liquide ou haute pression).

Un gazoduc occupe la même largeur de terrain qu'une ligne électrique haute tension, mais transporte cinq à dix fois plus de puissance pour un prix équivalent. Pour cette raison, il vaudra mieux fabriquer l'hydrogène là où l'énergie renouvelable est abondante et le transporter par gazoduc, plutôt que transporter l'électricité pour produire l'hydrogène dans le pays de consommation.

Le coût du transport des énergies, un coût d'infrastructures et de logistique

L'électricité, le pétrole, le gaz, la chaleur ou le froid nécessitent de forts investissements initiaux dans les réseaux de transport et de distribution et dans les moyens logistiques décrits plus haut.

Les formes solides comportent les investissements dans les navires, ports, trains, zones de stockage – les formes liquides peuvent aussi requérir des investissements dans des oléoducs. Les derniers kilomètres transportés par route comportent les coûts logistiques en camions et main d'œuvre, mais aussi les coûts cachés d'infrastructures routières.

Les modalités d'échanges internationaux varient fortement : 70% de la consommation de pétrole dans le monde donne lieu à des échanges internationaux, contrairement au gaz et au charbon, dont le volume d'échanges international reste encore faible, respectivement environ 30% et 20%.

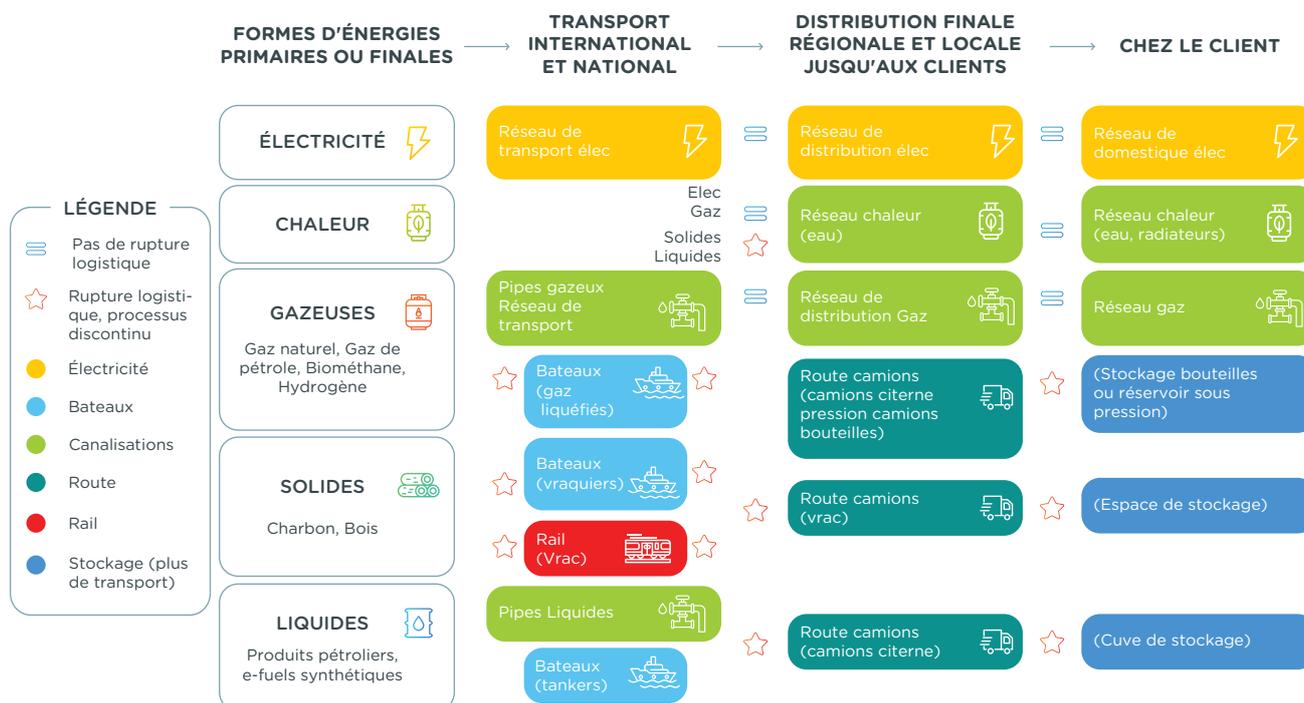


Figure 2.2 : Le transport et les ruptures logistiques des différentes formes d'énergies
Source : Analyse Capgemini

LES USAGES ET LEURS SOLUTIONS ÉNERGETIQUES

Cinq secteurs utilisent de l'énergie pour leurs usages : résidentiel, tertiaire, industriel, transports et production d'énergie.

Les usages quant à eux sont liés à des besoins. On a choisi ici une façon de les segmenter qui permet de

mieux distinguer les types d'énergies absolument nécessaires pour répondre à un besoin.

Cela permet aussi de visualiser à quels usages il vaut mieux réserver certaines énergies qui sont coûteuses à produire et nécessitent des chaînes longues dégradant le rendement. Le texte et le tableau de synthèse liste les usages et les solutions qui seront, selon nous, le plus communément envisagés d'ici 2030.

Chaleur haute température

Une température de plusieurs centaines à plusieurs milliers de degrés est requise dans des processus industriels pour produire les métaux, le verre, d'autres matériaux et les transformer (fours), mais aussi en agro-alimentaire et en résidentiel pour rôtir par rayonnement (cuisson de viandes).

Les formes d'énergies actuellement utilisées incluent les combustibles qui produisent des flammes de 1200°C à 1500°C, qu'ils soient fossiles ou issus de la biomasse ou du recyclage, ainsi que l'électricité avec des arcs ou des torches à plasma électriques.

Les solutions envisageables aujourd'hui ou qui pourraient l'être dans un horizon d'environ dix ans pour décarboner cet usage :

- **Forte réduction des émissions** : capture de CO₂ associée à la combustion de fossiles ou utilisation de gaz de synthèse,⁶²
- **Pas d'émissions** : électricité décarbonée, hydrogène décarboné qui produit une flamme à 2045°C,
- **Émissions nettes négatives** : capture de CO₂ associé à l'usage de biomasse ou de biogaz.

La capture de CO₂ et sa séquestration sont envisageables pour les sites industriels qui sont de taille importante.

Utiliser des carburants de synthèse liquide n'est a priori pas indiqué. Ces combustibles coûtent cher à produire tant économiquement qu'en ressources et en énergie. Mieux vaut les utiliser comme carburants dans les transports qui peuvent difficilement se passer de formes liquides.

Chaleur basse température

Plusieurs dizaines de degrés à une centaine de degrés, typiquement pour chauffer des bâtiments et de l'eau chaude sanitaire, mais aussi

pour sécher, bouillir... dans les secteurs résidentiels, tertiaires et industriels.

Les formes d'énergies actuellement utilisées sont quasiment les mêmes que pour la chaleur haute température, auxquelles on peut ajouter les réseaux de chaleur alimentés historiquement à partir d'énergies fossiles.

Les solutions envisageables aujourd'hui ou qui pourraient l'être dans un horizon d'environ dix ans pour décarboner cet usage : électricité décarbonée avec pompes à chaleur, biomasse, biométhane, biogaz, réseaux de chaleur produite à partir d'énergies décarbonées et de récupération (déchets, recyclage de chaleur basse température en sortie de processus industriels haute température).

Le froid

Il est utile pour le rafraîchissement des bâtiments résidentiels et tertiaires, dans la distribution de biens périssables et dans l'industrie.

Les équipements individuels ou centralisés de production de froid (climatiseurs, pompes à chaleurs réversibles, groupes froids) consomment essentiellement de l'électricité en rejetant la chaleur localement.

Les solutions envisageables aujourd'hui ou dans un horizon d'environ dix ans pour décarboner cet usage : électricité décarbonée, réseaux de froid utilisant des groupes froids performants ou utilisant la fraîcheur directement tirée de rivières ou du sous-sol.



Usages spécifiques à l'électricité

Il s'agit :

- de l'éclairage, des usages digitaux (ordinateurs, téléphones, écrans), des télécommunications,
- des machines tournantes et des moteurs utilisés dans le secteur résidentiel, tertiaire (l'électroménager, les ascenseurs) et industriel (usinage, assemblage, convoyage, ventilation). La praticité des moteurs électriques fait qu'il n'est pas envisagé de retourner à l'usage direct du vent ou de l'eau (moulins), et que les moteurs à explosion utilisant des combustibles fossiles ne sont quasiment utilisés que pour le transport.

Ces usages sont dits spécifiques car le recours à l'électricité est indispensable. Des réductions d'émissions de GES liées à ces usages peuvent être obtenues en décarbonant l'électricité.

⁶²Voir Chapitre 3

USAGES	SECTEUR	Solides Fossiles Charbon, Lignite, Tourbe	Liquides Fossiles Fuel, Essence, Diesel	Gaz Fossiles naturel, éthane, butane, propane	Solides Fossiles Bio-masse	Liquides Fossiles Bio/Agro carburants	Gaz Biogaz, Biométhane	Energies hautement transformées : vecteurs						Possibilité de capturer le CO ₂	
								Electricité	Réseau de chaleur et de froid	Hydrogène	Gaz de synthèse carbonés (*)	Liquides de synthèse carbonés (*)	Liquides de synthèse ammoniac et autres		
Chaleur haute température - plusieurs centaines à milliers de degrés.	IND, ENE	xxx	xxx	xxx	xxx		xxx	xxx		xxx	xxx				xxx
Chaleur haute température - plusieurs dizaines de degrés à centaine de degrés.	RES, TERT, IND	xxx	xxx	xxx	xxx		xxx	xxx	xxx	x	xxx				
Froid	RES, TERT, IND							xxx							
Usages spécifiques à l'électricité	RES, TERT, IND							xxx							
Machines et moteurs stationnaires	RES, TERT, IND							xxx							
Route - courte durée de une à quatre heures.	TRAN		xxx	xxx		xxx	xxx	xxx							
Route - moyenne durée jusqu'à la journée.	TRAN		xxx	xxx		xxx	xxx			xxx					
Rail - moyenne durée jusqu'à la journée.	TRAN		xxx					xxx		xxx					
Fluvial et maritime - courte durée jusqu'à quatre heures.	TRAN		xxx					xxx							
Fluvial et maritime - moyenne durée jusqu'à un ou deux jours.	TRAN		xxx							xxx					
Maritime - longue durée jusqu'à plusieurs dizaines de jours.	TRAN		xxx	xxx		xxx						xxx	xxx	xxx	
Aérien - courte durée	TRAN		xxx			xxx				xxx					
Aérien - moyenne durée jusqu'à 12 heures.	TRAN		xxx			xxx						xxx	xxx		

Légende :

- Disponible actuellement
- Disponibilité envisagée d'ici à 2030

IND = Industrie
TRAN = Transports
RES = Résidentiel
TERT = Tertiaire
ENER = Production d'énergie

(*) Décarbonation partielle de seulement 50%. Les gaz et liquides de synthèse carbonés recombinaient de l'hydrogène à du carbone capturé sur un processus industriel. Là où on émettait deux unités de carbone (une pour le processus industriel et une pour le transport) on n'émet plus qu'une unité de carbone (au niveau du transport).

Figure 2.3 : Tableau des usages, secteurs et énergies finales et capture CO₂ actuellement et d'ici 2030
Source : Analyse Capgemini



La mobilité des personnes et le transport de fret

Dans les transports, les deux critères clé de segmentation sont le mode (route, rail, fluvial ou maritime, aérien) et la durée qui exige d'embarquer une plus ou moins grande quantité d'énergie sous une forme viable pour ce mode. Enoncer la durée de transport plutôt que les kilomètres nous permet de comparer plusieurs modes de transport et plusieurs énergies.

Transports par route - Durée courte (d'1 à 4 heures)

Cela concerne principalement le transport de fret et de passagers localement, à l'intérieur des zones urbaines.

La solution actuelle repose sur les carburants fossiles liquides pétroliers et gazeux utilisés dans des moteurs à explosion pour les véhicules utilitaires, camionnettes, bus et voitures.

Les solutions envisageables aujourd'hui ou qui pourraient l'être dans un horizon d'environ dix ans pour décarboner cet usage :

- Réduction partielle des émissions de CO₂ : carburants fossiles liquides et gazeux avec amélioration de la performance des moteurs à explosion, réduction de la taille et du poids des véhicules, bio/agro carburants ou biométhane.
- Pas d'émissions : motorisation électrique avec batteries alimentées en électricité décarbonée, ou avec pile à combustible alimentée en hydrogène renouvelable.

- Pas d'émissions et moins de ressources naturelles requises, pour les transports courts de personnes individuelles : bascule de la voiture électrique individuelle vers la voiture électrique partagée et vers les modes de transports électrique légers biplaces et individuels.

L'hydrogène est aujourd'hui moins indiqué que l'électricité pour les voitures utilisées sur de petites durées pour des raisons de rentabilité économique, en revanche il peut être pertinent pour les véhicules utilitaires qui peuvent requérir plus d'autonomie.

Utiliser des carburants de synthèse liquide n'est a priori pas indiqué. Ces combustibles coûtent cher à produire tant économiquement qu'en ressources et en énergie. Mieux vaut



les utiliser comme carburants dans les transports qui ne peuvent se passer de formes liquides comme l'aérien et le maritime international.

Transport par route - Moyenne durée (jusqu'à la journée)

Cela concerne typiquement le transport de fret (camions) et de passagers (cars, voitures) à l'échelle nationale et internationale. Cela peut aussi concerner les véhicules utilisés intensivement toute la journée en milieu urbain (bus, camions de livraison, camions bennes, taxis, engins de chantier).

Les solutions pour décarboner cet usage sont les mêmes que précédemment, mais avec une

compétition plus forte, notamment pour le transport de fret et véhicules industriels lourds, entre l'électricité et l'hydrogène vert qui permet un stockage et une utilisation sur un nombre d'heures et une distance plus importante. Un véhicule hydrogène comporte un réservoir d'hydrogène, une pile à combustible qui transforme l'hydrogène en électricité, et un moteur électrique comme dans les véhicules électriques.

Transport par rail - Moyenne durée (jusqu'à la journée)

Cela concerne les trains transportant des passagers et du fret. Une partie des trains sont électriques, surtout dans les pays denses. Mais électrifier les lignes coûte cher. C'est pourquoi

une partie du transport par rail utilise encore des locomotives diesel, notamment en Europe.⁶³

Le recours aux biocarburants comme énergie de transition, l'électrification et le passage à l'hydrogène (réservoir hydrogène décarboné et pile à combustible qui produit l'électricité pour le moteur électrique) sont les principales solutions envisagées pour décarboner le transport par rail.

⁶³Source : IEA (International Energy Agency) – The future of Rail. All rights reserved. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>



Transport fluvial et maritime - Courte et moyenne durée (jusqu'à 1 ou 2 jours)

Il s'agit essentiellement des bacs et ferries de courte et moyenne distance et de transport de marchandises le long de fleuves qui recourent à des carburants liquides pétroliers utilisés dans des moteurs à explosion.

Les solutions envisageables pour décarboner ces usages reposent sur le recours au bioGNL, aux bio/agro carburants liquides, à l'électricité et sur le passage à l'hydrogène.

Transport maritime - Longue durée (jusqu'à plusieurs dizaines de jours)

Cela concerne le fret maritime international entre continents qui recourt à des carburants liquides pétroliers utilisés dans des moteurs à explosion.

Les solutions envisageables aujourd'hui ou dans un horizon d'environ dix ans pour décarboner cet usage :

- **Réduction des émissions de GES, de l'ordre de 20%** : passage au gaz naturel liquéfié (GNL). Le GNL est actuellement de plus en plus utilisé bien qu'il nécessite des réservoirs deux fois plus volumineux. Il permet de limiter les émissions de soufre.
- **Réduction de 50% des émissions** : e-carburants synthétiques carbonés.⁶⁴

- **Forte réduction des émissions** : capture du carbone à bord avec carburants fossiles classiques, agro/biocarburants. Le bioGNL permet d'améliorer immédiatement le bilan des émissions de gaz à effet de serre.
- **Pas d'émission** : e-carburants liquides non carbonés comme l'ammoniac⁶⁵ (mais qui occupent 2 fois plus de place que du GNL et quatre fois plus de place que du carburant pétrolier et sont toxiques),
- **Emissions négatives** : agro/biocarburants performants avec capture carbone à bord.

L'hydrogène n'est pas adapté sur ce type de long parcours. Un réservoir d'hydrogène liquéfié doit être 2,5 fois plus grand qu'un réservoir de GNL, ce qui revient à rajouter 40 mètres de longueur aux grands porte-conteneurs internationaux à GNL, et 7 fois plus grand qu'un réservoir de carburant pétrolier classique.

⁶⁴Les e-carburants synthétiques carbonés sont produits à partir d'hydrogène vert associé à du CO₂ capturé, par exemple à la sortie d'une centrale électrique à charbon. Là où il y avait 2 usages qui émettaient du CO₂ (la centrale électrique, le transport qui brûle le carburant fossile dans son moteur), il n'y a plus qu'1 usage qui rejette du CO₂ à l'atmosphère (le transport qui brûle le carburant synthétique dans son moteur en émettant du CO₂), soit une réduction globale de 50%

⁶⁵Les e-carburants non carbonés comme l'ammoniac sont produits en combinant l'hydrogène vert non pas à du CO₂ mais à de l'azote. Le moteur en brûlant le carburant n'émet que de l'eau et de l'azote. La réduction d'émissions est de 100%.



Transport aérien - Courte durée

Transport aérien de passagers et de fret à forte valeur ajoutée - national ou international proche. Le transport aérien recourt aux carburants pétroliers liquides, kérosène pour les propulsions à réacteurs et essence aviation pour les moteurs à piston pour hélices.

Le besoin d'emporter beaucoup d'énergie dans un volume réduit empêche aujourd'hui le recours à l'électricité avec batterie sauf pour des cas spécifiques d'avions légers sur de courtes distances.

Les solutions envisageables pour décarboner le transport aérien :

- Agro/bio carburants.
- E-carburants carbonés liquides de synthèse (division par deux des émissions).
- L'hydrogène liquide est aussi envisagé bien qu'il faille un volume quatre fois plus important pour emporter la même énergie qu'un carburant liquide pétrolier, avec un design d'avion adapté.
- L'électricité : envisagé dans certains pays pour les lignes intérieures.

Transport aérien - Longue durée (jusqu'à douze heures)

Le transport aérien sur de longs parcours transcontinentaux doit embarquer de grands volumes de carburants. Pour ces raisons les seules solutions envisageables concernent les carburants liquides à forte densité d'énergie par unité de volume (biocarburants et e-carburants carbonés).

2.2

La consommation d'énergie

LA SÉCURITÉ D'APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE

L'énergie est indispensable à l'activité humaine et au bien-être des hommes sur la Terre. Les pays se doivent d'assurer la sécurité d'approvisionnement en énergie et cette exigence figure souvent en tête des politiques publiques. On parle d'enjeu de souveraineté énergétique.

Le passé nous a appris que l'approvisionnement en énergie et la géopolitique sont souvent liés.⁶⁷ La concentration des ressources pétrolières au Moyen-Orient, la constitution du cartel de l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole) et l'embargo décrété par celui-ci en 1973 lors de la guerre de Yom Kippour ont conduit au premier choc pétrolier⁶⁸.

⁶⁷Geopolitics and energy Colette Lewiner E-Book WEMO 2020 www.capgemini.com

⁶⁸<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/choc-petrolier>



C'est à la suite de ce choc pétrolier que des politiques d'amélioration d'efficacité énergétique⁶⁹ et une diversification des sources d'énergie se sont mises en place. Pour améliorer son indépendance énergétique, la France a lancé un important programme de construction de centrales nucléaires.

La production de pétrole et de gaz de schistes⁷⁰ a permis aux États-Unis de devenir à partir de 2018, le premier producteur mondial de pétrole et de gaz et par là même d'assurer son indépendance énergétique.

En janvier 2009⁷¹, à la suite d'un des nombreux conflits entre la Russie et l'Ukraine, l'Europe a été privée du gaz russe pendant plusieurs semaines et certains pays qui dépendaient fortement de cet approvisionnement

(Grèce, Bulgarie, pays des Balkans) ont été privés de chauffage au pic de l'hiver. De plus, l'épuisement des gisements de gaz exploités en mer du Nord⁷² fragilise l'indépendance européenne. Mais en parallèle, à la faveur de l'ouverture à la concurrence initiée par la Commission Européenne, les terminaux d'importation de GNL se sont multipliés sur les côtes européennes. Ils ont permis de diversifier l'approvisionnement de gaz et d'atténuer les craintes générées par ce type d'évènements.⁷³

Le développement des énergies renouvelables est porté à la fois par la volonté de limiter les émissions de GES (voir Chapitre 3) et par la baisse impressionnante de leur coût. Comme leur « carburant » (soleil et

vent) est universellement partagé, les tensions géopolitiques liées à l'énergie se détendent, avec un risque toutefois de transfert de ces tensions sur l'approvisionnement en matières premières stratégiques pour leur fabrication. Panneaux solaires, turbines d'éoliennes, batteries sont largement importés (Chine, Asie) et contiennent des terres rares et des métaux rares⁷⁴. Ceux-ci sont majoritairement extraits ou raffinés en Chine (comme le lithium, le cobalt ou le graphène) créant une dépendance par rapport à ce pays en particulier.

En 2017, l'Europe a lancé un plan stratégique « *European Battery Alliance* »⁷⁵ pour rapatrier une partie de cette production et assurer une certaine souveraineté.

⁶⁹Avec une meilleure efficacité énergétique on diminue la consommation d'énergie à service rendu égal

⁷⁰<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gaz-de-schiste>

⁷¹<https://www.cairn.info/revue-geoeconomie-2014-4-page-95.htm>

⁷²<https://www.total.com/fr/medias/actualite/communiqués/royaume-uni-total-fait-une-nouvelle-decouverte-en-mer-du-nord>

⁷³Invasion de la Crimée par la Russie en 2014

⁷⁴<https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/0a2d257c-e1e7-4f3f-8562-3d977e983eb5/files/a7b3092a-ed0b-4ffd-b9b5-e44175258929#:~:text=En%202018%2C%20la%20Chine%20est,produits%20transform%C3%A9s%2C%20parfois%20tr%C3%A8s%20sophistiqu%C3%A9s.>

⁷⁵European Battery Alliance (EBA 250). <https://www.eba250.com/about-eba250/>

LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE MONDIALE EST EN CROISSANCE

L'augmentation de la population mondiale et de son niveau de vie ont conduit à une augmentation constante de la consommation d'énergie depuis la révolution industrielle. Les efforts d'efficacité énergétique mis en œuvre dans l'OCDE depuis une cinquantaine d'années n'ont pas été suffisants pour freiner notablement cette

évolution. Pour déterminer le niveau de consommation d'énergie, on agrège la consommation d'énergie primaire de l'ensemble des pays, tous secteurs confondus⁷⁶. En 2019, la consommation énergétique mondiale atteignait 606 EJ⁷⁷, en hausse de 0,7%⁷⁸ par rapport à 2018.

L'année 2019 est probablement une meilleure référence pour l'analyse des tendances à moyen terme que 2020.

En effet, l'année 2020 a été

particulière à cause des effets de la pandémie sur l'économie mondiale avec notamment une période de confinement quasi-mondiale au printemps durant laquelle la consommation d'énergie a baissé d'environ 20%.

L'énergie consommée est encore aujourd'hui produite à 81,3% à partir de combustibles fossiles.

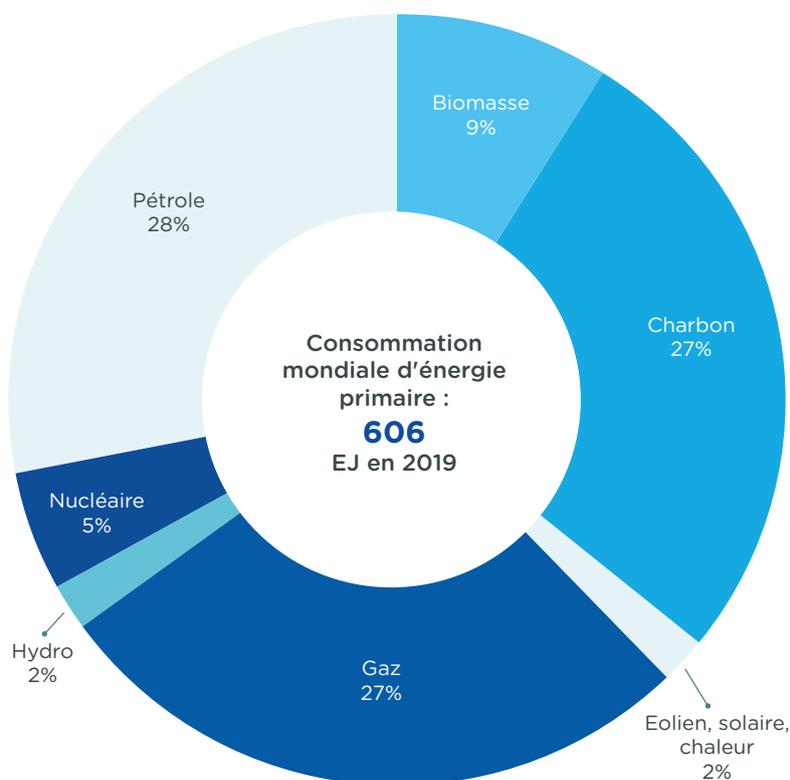


Figure 2.4 : Consommation globale d'énergie par source d'énergie primaire (en pourcentage et EJ)
Source : IEA Key World Energy Statistics 2021

⁷⁶Voir Chapitre 4 pour l'explication des méthodes de conversion des énergies

⁷⁷Source : IEA (International Energy Agency) (2021) Key World energy statistics 2021. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/energy-balances>. All rights reserved.

⁷⁸Source : IEA (International Energy Agency) (2020) World Energy Outlook 2020, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> All rights reserved.

	2000	2010	2019	CAGR ⁷⁹ 2000 - 2019	CAGR 2010 - 2019
Demande Pétrole (EJ)	131	151	170	+1,4%	+1,3%
Demande Gaz (EJ)	47	57	69	+2,0%	+2,2%
Demande Charbon (EJ)	23	44	39	+2,9%	-1,3%
Demande globale d'énergie (EJ)	294	370	419	+1,9%	+1,4%
Demande Electricité (EJ)	46	64	82	+3,1%	+2,8%
PIB en G\$	48 313	64 894	84 165	+3,0%	+2,9%
Population (milliards)	6,1	6,9	7,7	+1,2%	+1,2%

Figure 2.5 : Chiffres-clés concernant la demande d'énergie finale dans le monde

Source : AIE World Energy Balances 2021

LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ, VECTEUR DE DÉCARBONATION DE L'ÉCONOMIE, AUGMENTE PLUS VITE QUE CELLE EN ÉNERGIE PRIMAIRE

La consommation d'électricité augmente vite

La consommation d'électricité continue de croître à travers le monde et a atteint 22848 TWh en 2019 alors qu'elle n'était que de 9702 TWh en 1990. Une demande qui a ainsi plus que doublé en moins de 30 ans selon une croissance à peu près linéaire. Depuis 2000 le taux de croissance annuel moyen de la consommation d'électricité dépasse largement celui de l'énergie primaire

à 3,1 % par an contre 1,9 % par an.

Lorsqu'on examine la consommation d'énergie en énergie primaire et finale, on constate ainsi une augmentation continue de la part de l'électricité. En 2019, 20% de la consommation énergétique finale dans le monde se fait par le biais de l'électricité, alors qu'elle ne représentait que 10% de cette consommation en 1973.

Cette augmentation de la consommation d'électricité dans le monde s'explique principalement du fait de :

- L'accroissement de la population mondiale, qui fait mécaniquement croître la demande en énergie. Selon l'ONU, la population mondiale pourrait atteindre 9,7 milliards d'êtres humains en 2050 et 11 milliards en 2100⁸⁰. Elle est de 7,8 milliards de personnes en 2020 contre 6,1 milliards en 2000.

- L'augmentation de l'électrification. Environ un milliard de personnes n'ont toujours pas accès à l'électricité⁸¹ aujourd'hui mais la tendance d'électrification se poursuit dans les pays en développement.
- L'accroissement de la part d'activités du secteur tertiaire, notamment dans les pays développés. En France par exemple, elle est passée de 42% en 1962 à 75,9% en 2017⁸².
- L'augmentation de la consommation de chauffage électrique et de climatisation des particuliers.
- L'augmentation du nombre de processus électrifiés dans l'industrie.
- Le développement de l'informatique et des télécommunications.

Par ailleurs l'électrification est un levier majeur des politiques de baisse des émissions et de neutralité

⁷⁹Taux de croissance moyen annuel

⁸⁰<https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/population/index.html#:~:text=Selon%20les%20projections%2C%20la%20population,individus%20vers%20l'an%202100.>

⁸¹<https://ourworldindata.org/energy-access>

⁸²<https://www.vie-publique.fr/fiches/269995-les-grands-secteurs-de-production-primaire-secondaire-et-tertiaire>

carbone des pays engagés dans la transition énergétique, ce qui suppose bien entendu que la production d'électricité soit elle-même décarbonée.

Comme analysé plus loin, la substitution d'une électricité décarbonée à des énergies fossiles permettra de limiter les émissions de GES, notamment des secteurs du transport et de l'industrie.

L'électricité est utilisée dans l'ensemble des secteurs de consommation et particulièrement dans l'industrie (42%) et le résidentiel (27%).

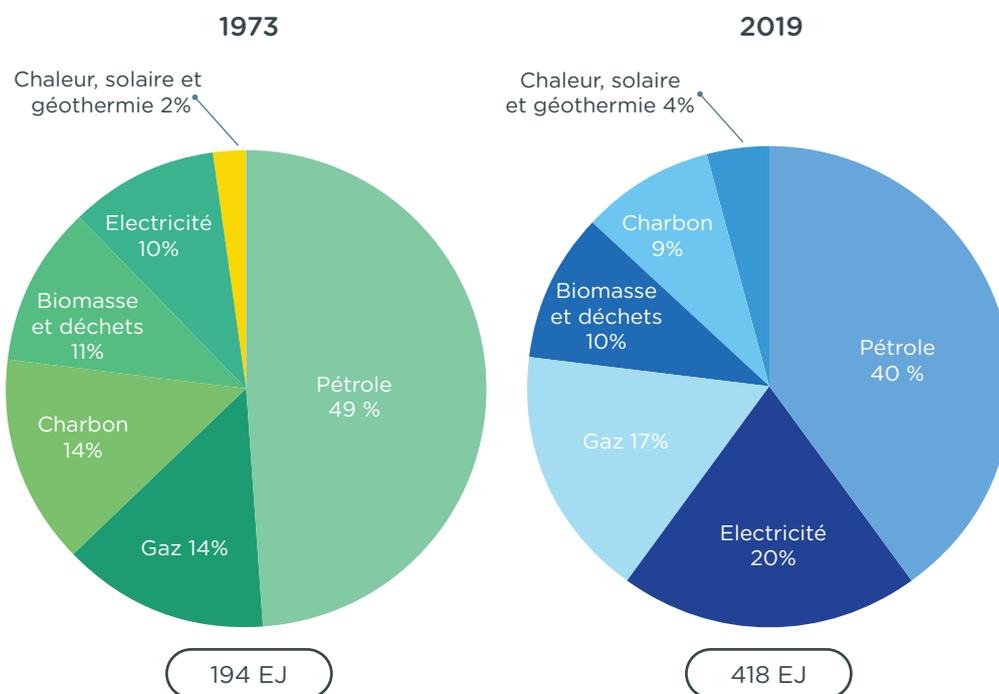


Figure 2.6 : Evolution de la consommation mondiale finale d'énergie par source en pourcentage et en EJ
Source : IEA Key World Energy Statistics 2021

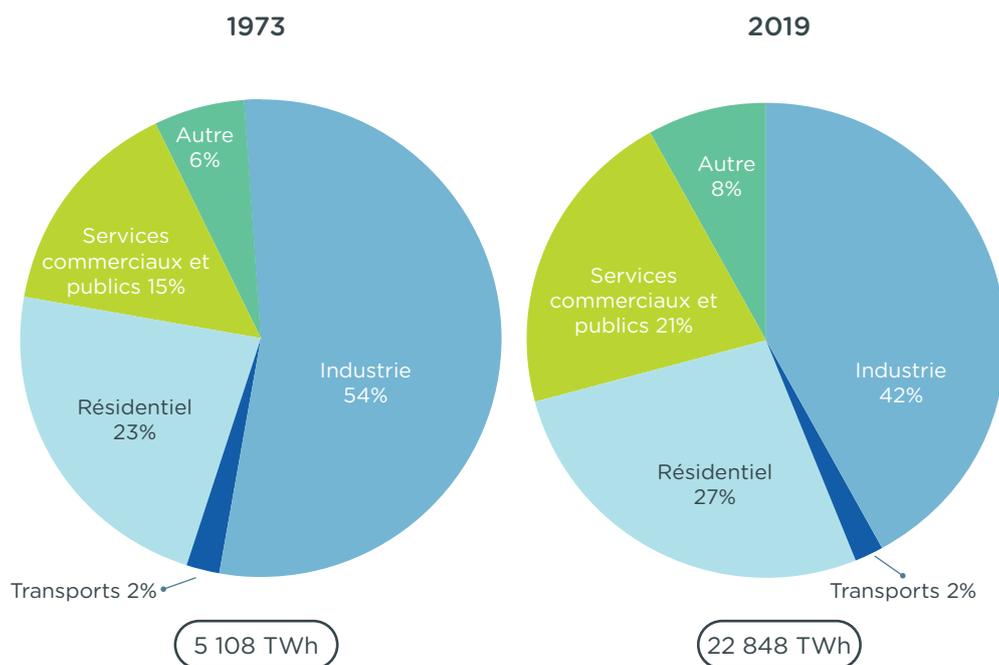


Figure 2.7 : Répartition de la consommation finale d'électricité dans le monde en TWh et pourcentage
Source : AIE World Energy Balances 2021
A noter : Autres : autoconsommation des centrales électriques, extraction d'hydrocarbures

Décarbonation de la production d'électricité

Comme souligné plus haut, pour que la substitution d'électricité à des énergies fossiles se traduise par une baisse des émissions de GES, il faut que les sources de production d'électricité émettent elles-mêmes moins de GES. C'est un enjeu majeur de la transition énergétique.

La figure 2.8 montre l'évolution de ces sources dans le temps avec une augmentation forte du solaire et de l'éolien particulièrement. Avec les politiques de transition énergétique et les incitations publiques aux investissements dans les énergies renouvelables, leur part dans le mix électrique mondial devrait continuer à croître. En 2018, la part des énergies renouvelables (hydraulique, éolien,

solaire, biomasse) dans la production électrique mondiale s'élevait à 27% (voir Figure 1.7 – Production d'électricité dans le monde par source (1990 – 2019)).

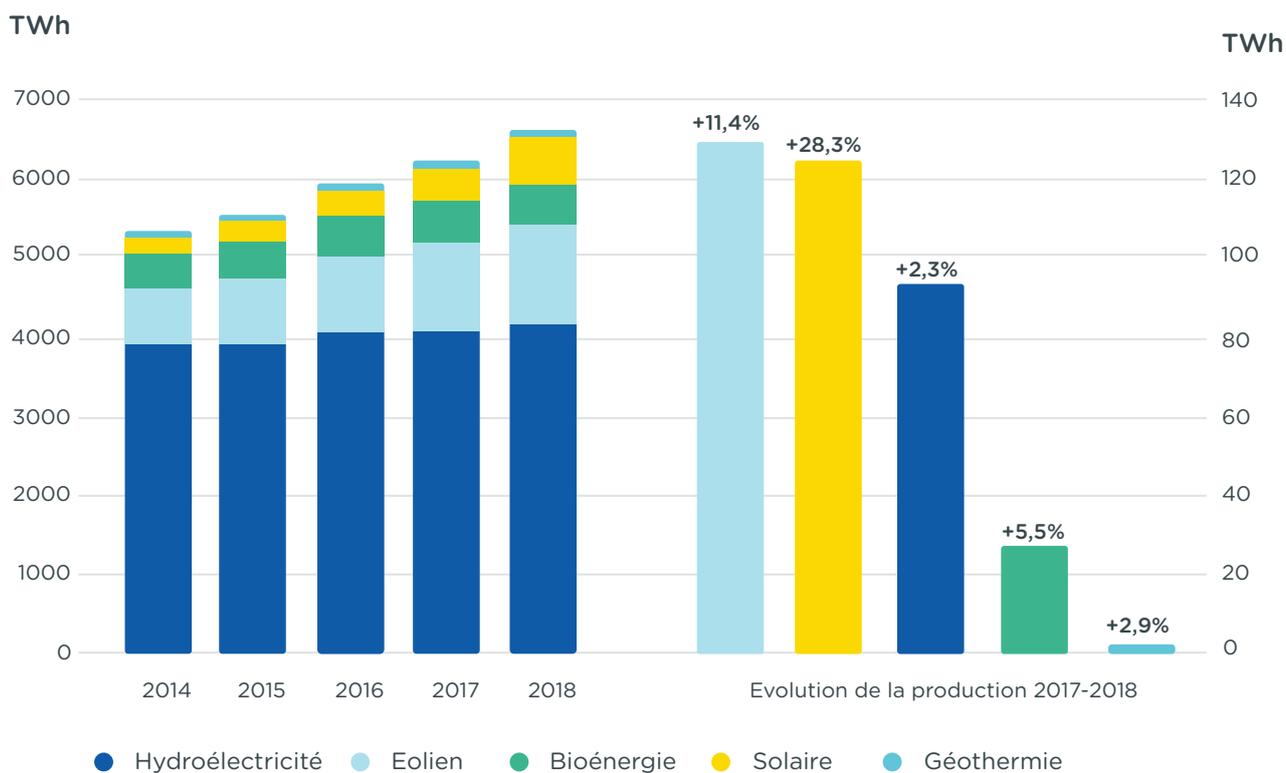


Figure 2.8 : Croissance de la production d'électricité renouvelable dans le monde entre 2014 et 2018
Source : IRENA, Juillet 2020

LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PAR SECTEUR

Au début de ce chapitre, nous avons décrit les énergies les plus adaptées à chaque usage. En reprenant la même segmentation des secteurs, on peut analyser leur part dans la consommation énergétique mondiale, l'évolution de leur consommation et les sources d'énergies utilisées.

L'électricité devrait de plus en plus être produite à partir d'énergies primaires décarbonées et nationales. Lorsque c'est le cas, comme illustré plus haut, l'augmentation de son utilisation permet de décarboner l'économie mais aussi d'accroître l'indépendance énergétique.

Les secteurs les plus consommateurs d'énergie étaient en 2018 : les transports (32 %), l'industrie (31,5%) et le résidentiel (23,2%).⁸³

Les figures 2.9 et 2.10 montrent, par secteur, la croissance de la demande énergétique et la répartition des sources d'énergie :

- La croissance de la demande du secteur des transports est la plus forte avec une quasi-totalité (92%) de l'énergie finale consommée provenant du pétrole. La part grandissante des véhicules électriques dans le parc automobile (s'ils sont alimentés par une électricité décarbonée) permettra de réduire les émissions de GES⁸⁴ de ce secteur. Les véhicules électriques, qui représentaient en 2019 7 millions de véhicules, ont connu une très forte croissance de leurs ventes en 2020⁸⁵, au point d'atteindre les 11 millions d'unités.⁸⁶ Ils représentent désormais 0,9% du parc automobile mondial. Le nombre de véhicules légers électrifiés doit atteindre 350 millions en 2030 et près de 2 milliards en 2050 dans le scénario « Net Zero by 2050 » ou NZE⁸⁷ de l'AIE.
- Plus des 2/3 (68%) de la consommation de l'énergie finale

par l'industrie est issue d'énergies fossiles. A terme, l'électrification des procédés et l'introduction d'hydrogène décarboné devraient permettre de décarboner ce secteur.

- Dans le secteur résidentiel l'électricité représente 37% de la consommation finale et le gaz 38%. L'enjeu y est principalement une décroissance de la consommation à la fois dans les bâtiments neufs grâce à l'innovation dans la construction, les normes et règlements et la rénovation de bâtiments existants. Les progrès techniques (comme les ampoules LED⁸⁸ pour l'éclairage ou les pompes à chaleur pour le chauffage) permettent de diminuer la consommation d'énergie.
- Le secteur de l'informatique et des télécommunications qui permet grâce notamment aux objets connectés de mieux maîtriser la consommation énergétique voit, avec les usages croissants du numérique, sa consommation propre augmenter. Selon certaines projections⁸⁹ elle pourrait atteindre entre 10 et 20% de la consommation

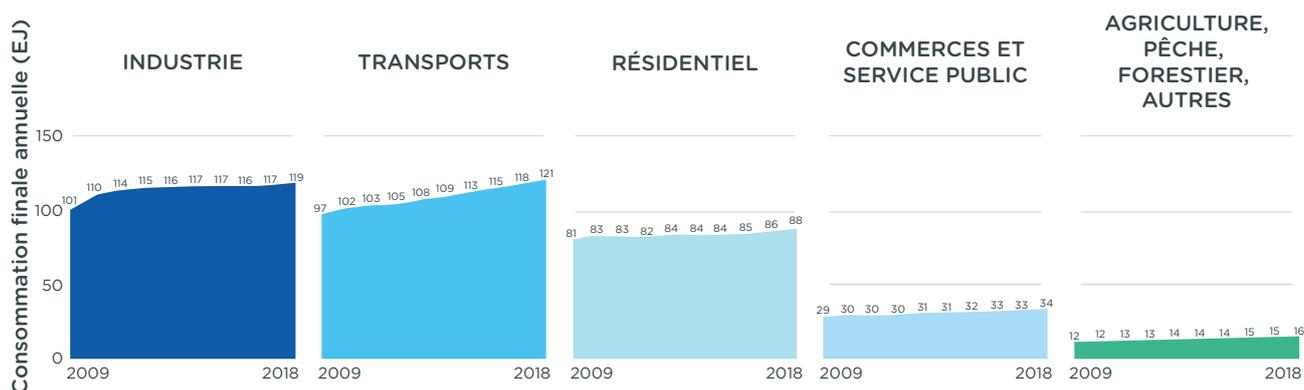


Figure 2.9 : Evolution de la consommation finale d'énergie par secteur (2009 - 2018) en EJ

Source : IEA (International Energy Agency) (2020) World Energy Outlook 2020, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> All rights reserved.

⁸³AIE (2020)

⁸⁴Voir Chapitre 3

⁸⁵Source : IEA (International Energy Agency) (2020) Global EV Outlook 2021. All rights reserved. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>

⁸⁶Source : IEA (International Energy Agency) (2020) Global EV Outlook 2021. All rights reserved. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>

⁸⁷Source: IEA (International Energy Agency) (2020) Net Zero by 2050 - A roadmap for the global Energy Sector, May 2021. All rights reserved.

<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

⁸⁸<https://www.quechoisir.org/guide-d-achat-ampoules-basse-consommation-led-n11547/#:~:text=Une%20ampoule%20C3%A9%20LED%20consomme,fois%20moins%20qu'une%20halog%C3%A8ne.>

⁸⁹<https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/between-10-and-20-electricity-consumption-ict-sector-2030.html>

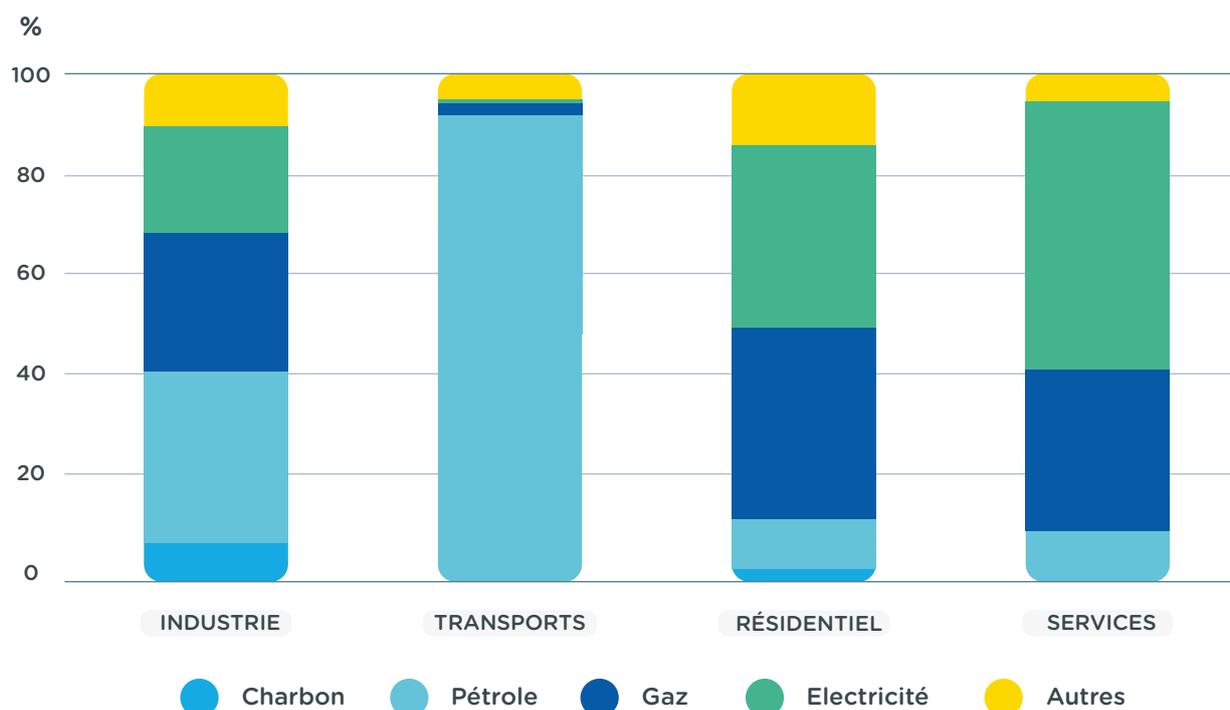


Figure 2.10 : Consommation finale d'énergie par secteur et par source en 2018 dans les pays de l'OCDE (en pourcentage)

Source : IEA (International Energy Agency) (2020) Key World energy statistics 2020. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>. All rights reserved.

mondiale d'énergie en 2030. Les opérateurs de ce secteur, et notamment ceux de centres abritant les serveurs de données, ont commencé à mettre en œuvre des politiques visant à limiter cette croissance.

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE, UNE SITUATION CONTRASTÉE ENTRE PAYS DÉVELOPPÉS ET PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Si la consommation énergétique mondiale continue de croître, celle-ci évolue de manière différenciée selon les régions. En effet, on constate des dynamiques différentes entre les pays développés et les pays en développement : ces derniers ont

une consommation qui augmente alors que celle des pays développés tend à stagner notamment en raison des efforts d'efficacité énergétique. Ceci est illustré par la figure 2.11 : alors que les pays de l'OCDE⁹⁰ représentaient 60% de la consommation mondiale en 1973, ils n'en représentent plus que 38% en 2018.

Au sein des pays non-OCDE, la part de la Chine dans la consommation mondiale est passée de 7,8% en 1973 à 21% en 2019 alors que le volume total d'énergie consommée a plus que doublé, passant de 194 EJ à 418 EJ. Dans le même temps,

⁹⁰<https://www.oecd.org/fr/apropos/membres-et-partenaires/>

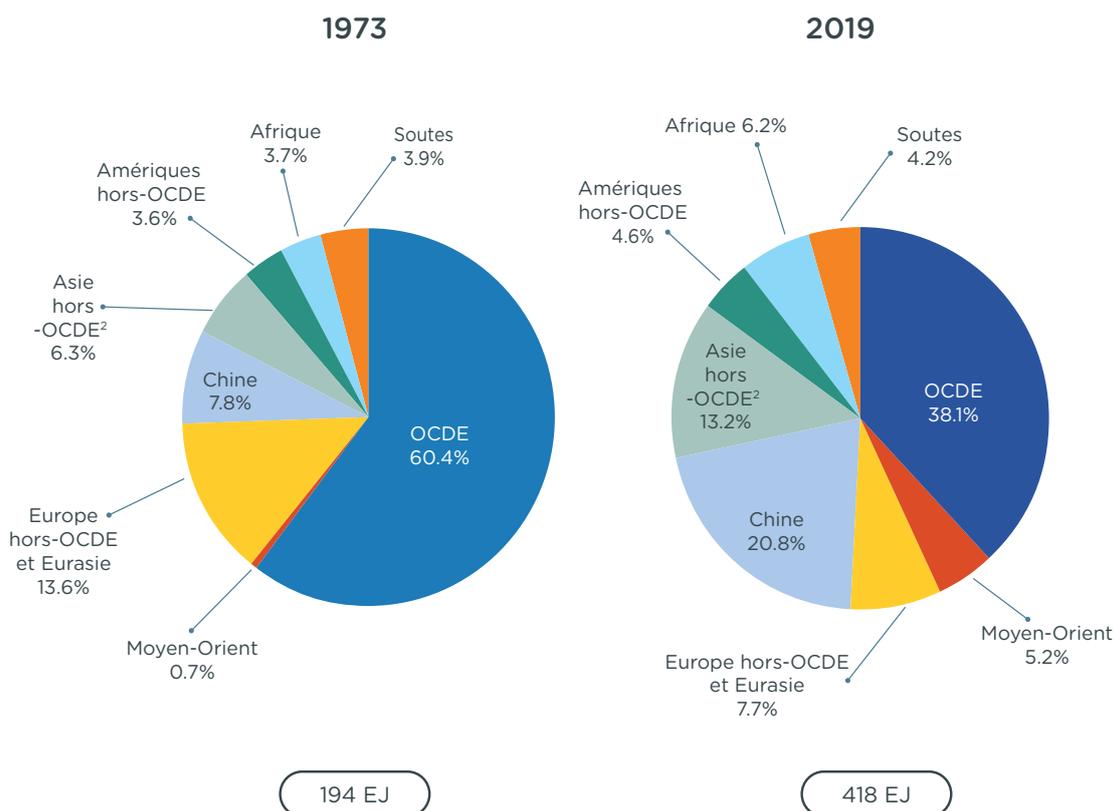


Figure 2.11 : Evolution de la consommation d'énergie par zone géographique (1973 - 2018) en pourcentage et EJ

Source : IEA (International Energy Agency) – Key World Energy Statistics 2021. All rights reserved. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>

l'Afrique et les pays asiatiques qui ne font pas partie de l'OCDE (hors Chine) voient leur part doubler, en passant respectivement de 3,7% à 6,2% et de 6,3% à 13,2%.

En 2019, alors que la consommation énergétique a augmenté de 3,1% en Chine, elle a diminué de 1,7% en Europe et de 1% aux Etats-Unis.

Limiter la quantité d'énergie consommée dans le monde représenterait une première solution pour répondre au défi climatique et limiter les émissions de GES. Compte tenu de la croissance de la population mondiale et du lien entre le niveau de vie et la consommation d'énergie, l'efficacité énergétique représente un levier incontournable de la transition énergétique.⁹¹

La consommation d'énergie est liée au niveau de vie

La figure 2.12 illustre, pour l'année 2015, la corrélation entre le PIB⁹² par habitant (qui est un bon indicateur du niveau de vie) et la consommation énergétique.

⁹¹Par exemple, en 2008, l'Union Européenne a adopté le paquet Energie-Climat qui visait notamment à accroître l'efficacité énergétique de 20 % à l'horizon 2020 . Cet objectif a été atteint. De la même façon, l'intensité énergétique a diminué de 2,5% dans les pays de l'OCDE en 2019.
⁹²PIB : Produit Intérieur Brut

PIB PAR HABITANT VERSUS UTILISATION D'ÉNERGIE EN 2015

Utilisation annuelle d'énergie par habitant, mesurée en kilowatt-heure par personne versus produit intérieur brut (PIB) par habitant, mesuré en dollars (\$) en 2011

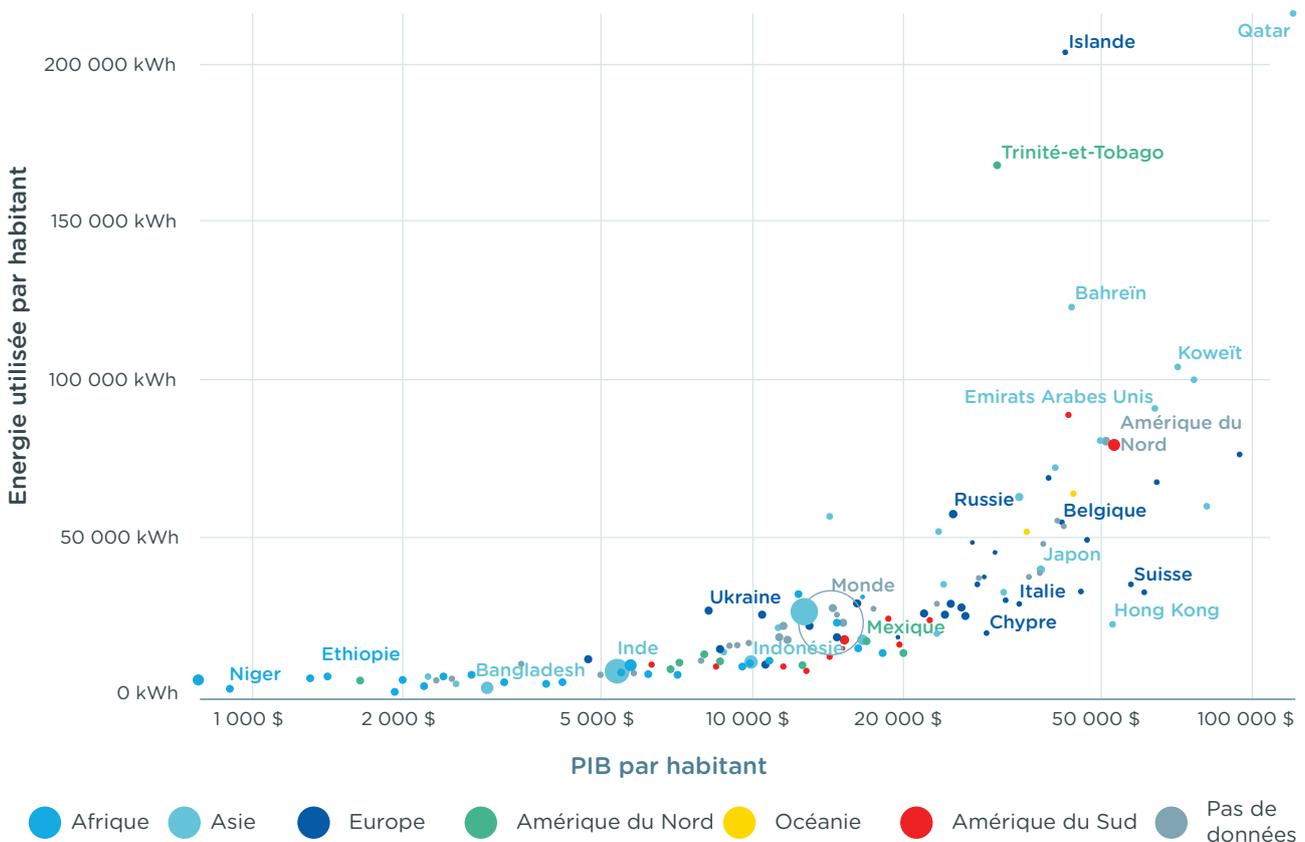


Figure 2.12 : Corrélation entre niveau de vie et consommation d'énergie (PIB / énergie utilisée en kWh par habitant) en 2015

Source : IEA (International Energy Agency) via The World Bank. All right reserved. <https://ourworldindata.org/grapher/energy-use-per-capita-vs-gdp-per-capita>

La consommation d'énergie augmente dans les pays en développement

Dans les pays en développement, l'énergie consommée a augmenté drastiquement au cours des 50 dernières années avec une accélération exponentielle au début des années 2000. Cette envolée est principalement portée par le développement économique des géants chinois et indiens. On constate également qu'entre 2017 et 2018, la Chine a représenté plus de

75% de l'augmentation de la consommation d'énergie dans le monde, l'Inde et l'Indonésie complétant le podium.⁹³

L'augmentation du niveau de vie des populations de ces pays, induit par le développement économique, a fait bondir leur consommation énergétique.

Répondre à cette demande croissante d'énergie permettra de répondre aux nombreux enjeux que les pays en développement doivent affronter :

- Améliorer la vie quotidienne, en automatisant certaines tâches mécaniques du quotidien,
- Contribuer à la santé des populations,
- Améliorer l'éducation grâce à des salles de cours mieux équipées la journée et éclairées le soir,
- Développer l'économie locale en permettant aux populations de travailler dans d'autres secteurs d'activités que l'agriculture et éviter qu'elles ne s'exilent dans les grandes villes pour trouver un emploi.

⁹³Source : IEA (International Energy Agency) – World Energy Balance 2020. All rights reserved. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>

1,9
tep/hab

Consommation mondiale moyenne d'énergie primaire par habitant en 2019

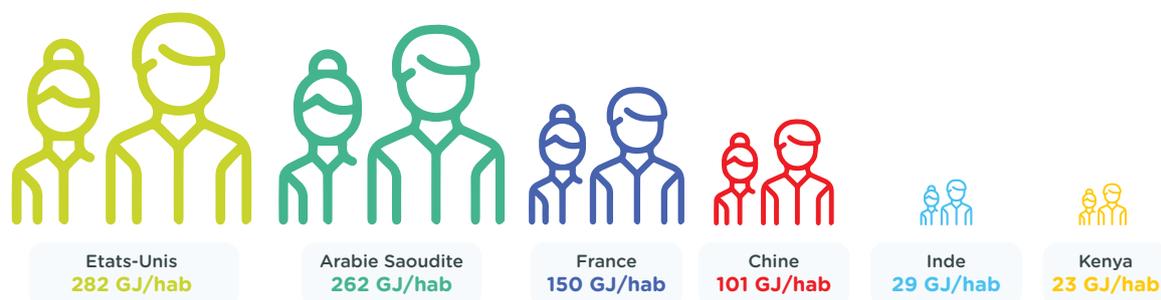


Figure 2.13 : Exemples de consommation moyenne par habitant dans des pays développés et en développement

Source : IEA (International Energy Agency) (2021) Key World Energy Statistics 2021, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf> All rights reserved.

Les habitants des pays en développement tendent à adopter un modèle de vie très consommateur d'énergie comme l'ont fait auparavant les pays développés pour atteindre leur niveau de confort actuel.

Dans le cadre de la transition énergétique, le maintien du développement en cours des pays les moins avancés nécessitera un fort support technologique et financier, de la part des pays développés, pour opérer leur transition vers une économie et une énergie à faible intensité carbone en moins de temps qu'il n'en a fallu pour les pays à économie avancée actuels.

Cela suppose notamment de :

- Encourager des modèles de production d'énergie décentralisés et décarbonés pour pallier le manque d'électrification notamment en Afrique.

- Augmenter l'électrification et développer des connections entre réseaux électriques nationaux pour assurer la sécurité d'approvisionnement électrique.
- Elaborer des modèles de consommation d'énergie finale centrés autour de l'électricité, elle-même produite à partir d'énergies décarbonées.
- Transférer les technologies des pays industrialisés pour améliorer l'efficacité énergétique.

L'article 6 de l'Accord de Paris, revêt également une importance particulière en raison de son incitation à la coopération internationale volontaire pour permettre une plus grande ambition.

La consommation stagne ou diminue dans les pays développés

Dans ces pays, la situation est différente. En effet, les politiques publiques menées au cours des dernières décennies pour maîtriser la consommation énergétique ont porté leurs fruits.

Ainsi en 2019, la consommation d'énergie primaire aux Etats-Unis a diminué de 0,8% par rapport à 2018. De même en France où la consommation d'énergie primaire a décliné la même année de 1,4%⁹⁴.

Une autre illustration de cette décroissance est donnée par le pétrole dont la consommation passe de 1 924 à 2 397 millions de tonnes entre 2010 et 2019 pour les pays hors-OCDE, tandis que dans les pays de l'OCDE, la demande diminuait en passant de 2 140 à 2 077 millions de tonnes.

⁹⁴Source : IEA (International Energy Agency) – World Energy Balance 2020. All rights reserved. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>

Dans les pays développés, de nombreux mécanismes ont été mis en place pour améliorer l'efficacité énergétique. On peut citer par exemple :

- La législation au niveau de l'Europe par exemple avec le paquet « Energie Climat » et au niveau de nombreux pays européens avec des lois de transition énergétique.
- La réglementation qui impose des normes de construction pour les bâtiments neufs (bâtiments à faible consommation voire à énergie positive).
- La réglementation qui impose, à travers la limitation des émissions de CO₂ des véhicules vendus, aux

constructeurs, la réduction de consommation des moteurs thermiques.

- Les restrictions de circulation dans certaines villes pour les véhicules les plus consommateurs et les plus émissifs.
- Les incitations financières ou fiscales : par exemple pour la rénovation énergétique des bâtiments.
- Les certificats d'économie d'énergie qui imposent par exemple en France, aux vendeurs d'énergie de faire faire des économies d'énergies à leurs clients.

On voit également un changement d'attitude des consommateurs avec le développement :

- De l'autoconsommation qui consiste à produire soi-même (essentiellement grâce à l'énergie solaire) une partie de son électricité.
- Des micro-réseaux qui reflètent la volonté des habitants d'un quartier, par exemple, de mieux maîtriser leur consommation électrique et de l'échanger entre eux.
- Des villes intelligentes qui sont aussi moins consommatrices d'énergie.



Ce type de cadre législatif ou réglementaire et ces évolutions des comportements sont des éléments essentiels pour favoriser le passage à un monde neutre en carbone (voir chapitre 5).

Nous l'avons vu dans ce Chapitre, croissance de la population et développement génèrent une demande croissante en énergie, notamment dans les pays en développement. Au sein de cette demande plus forte en énergie, la demande d'électricité est amenée à croître plus vite que les autres énergies et sa part dans la consommation finale d'énergie devrait également augmenter car c'est un élément clé des politiques dites bas carbone.





3

Le changement climatique

3.1

Introduction

Les conditions climatiques sur la planète ont beaucoup varié au cours des millions d'années passées avec des périodes de glaciation et de réchauffement interglaciaires.⁹⁵ Ces phénomènes ne sont pas encore complètement expliqués. Ils se sont déroulés sur de très longues périodes permettant une certaine adaptation des espèces animales et végétales.

Ces changements climatiques ont été à l'origine de migrations humaines. Ainsi, le philosophe grec Théophraste, dans son ouvrage « Des vents », écrit déjà que sur les monts crétois, on pouvait voir des ruines d'anciennes cités abandonnées depuis longtemps pour des raisons climatiques.

⁹⁵IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.



Les variations climatiques ont commencé à être étudiées scientifiquement au XVIII^e siècle, notamment grâce aux progrès de la paléontologie, mais c'est seulement à partir de l'entre-deux-guerres que la climatologie se constitue comme science véritable.

Le changement climatique tel que nous l'entendons communément, est un des défis majeurs du XXI^e siècle et fait référence à la modification durable du climat causée par les activités anthropiques (liées à l'homme). Ces variations climatiques sont bien plus rapides que toutes les variations précédentes.

Le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution

du Climat)⁹⁶ a été créé en 1988 pour synthétiser les travaux publiés chaque année par des milliers de chercheurs qui analysent les tendances et les prévisions du climat à l'échelle mondiale. Il a aussi pour mission de transmettre ces connaissances aux décideurs et de les alerter.

Dans le GT1 du sixième rapport d'évaluation publié le 9 août 2021, le GIEC énonce qu'il n'y a plus d'équivoque sur le fait que l'humanité a réchauffé l'atmosphère, l'océan et les terres émergées. Il constate que le nombre de changements relevés sont sans précédent depuis des milliers, voire des centaines de milliers d'années, et certains phénomènes déjà en cours - comme

l'élévation continue du niveau de la mer - sont irréversibles sur des centaines ou des milliers d'années.⁹⁷ Le GIEC prévient que si les émissions anthropiques de GES ne sont pas freinées, on assistera à un réchauffement supplémentaire de la planète au delà du seuil de 1,5°C qui sera atteint ou franchi en moyenne dans les 20 prochaines années ainsi qu'à une modification durable du système climatique et de la biodiversité. Cette modification climatique augmentera la probabilité de conséquences graves, généralisées et irréversibles pour les populations et les écosystèmes qui diffèrent selon la région et qui augmenteront tous avec la poursuite du réchauffement.

⁹⁶Le GIEC a été créé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme sur l'Environnement des Nations Unies (PNUE).

⁹⁷https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_fr.pdf

3.2

L'effet de serre

L'effet de serre⁹⁸ est un phénomène naturel, qui permet à la surface de la Terre d'avoir une température moyenne d'environ 15°C (contre -18°C en l'absence d'effet de serre).

Une serre est une structure vitrée qui laisse passer les rayons du soleil de l'extérieur vers l'intérieur, mais qui ne laisse que très peu s'échapper la chaleur formée à l'intérieur.

⁹⁸<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-changement-climatique.pdf>

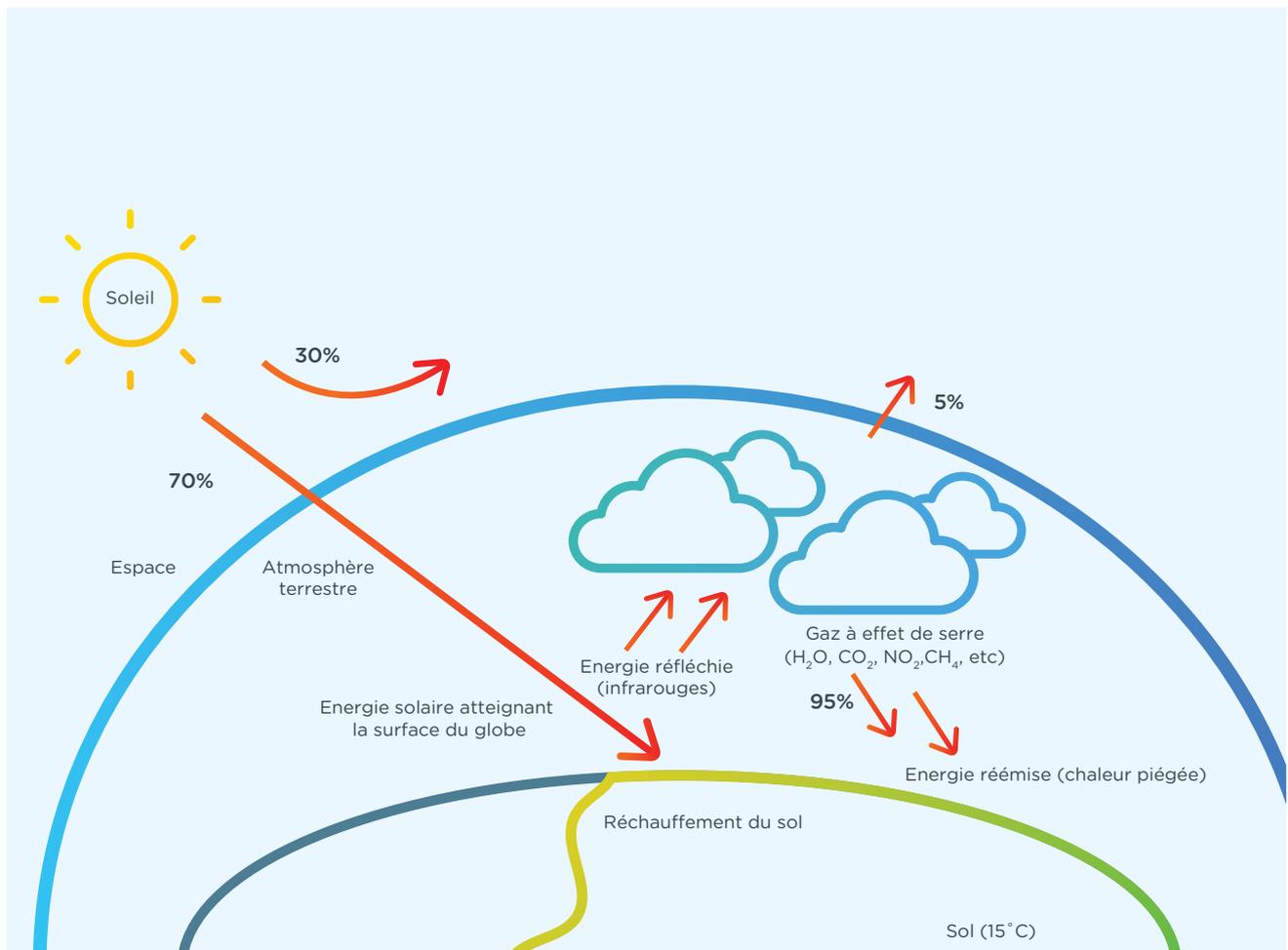


Figure 3.1 : Le phénomène de l'effet de serre
 Source : US Energy Information Administration

Lorsque les rayons solaires pénètrent dans la serre, l'intérieur se réchauffe et émet un rayonnement infrarouge.⁹⁹ Or ces rayons infrarouges sont bloqués par les vitres (le verre est opaque aux infrarouges) et réchauffent encore plus l'intérieur. C'est l'effet de serre.

Au niveau de la Terre, on peut assimiler la surface vitrée de la serre à l'atmosphère. Plus précisément, ce sont les GES présents dans l'atmosphère qui jouent ce rôle : ces gaz laissent passer les rayons du soleil jusqu'à la surface de la Terre, mais ils empêchent le rayonnement infrarouge émis par le sol de repartir vers l'espace. Ils piègent donc l'énergie solaire à proximité du sol, ce qui fait augmenter la température.

⁹⁹<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-infrarouge-1011/>

3.3

Les Gaz à Effet de Serre (GES)

Les Gaz à Effet de Serre (GES) occupent moins de 0,1% du volume atmosphérique. La vapeur d'eau, qui fluctue entre 0,4 et 4%, est le principal gaz à effet de serre¹⁰⁰. La vapeur d'eau absorbe très efficacement l'énergie thermique dans l'air, mais ne s'accumule pas dans l'atmosphère comme le font les autres GES. Sa durée de vie est très courte car elle se précipite rapidement sous forme d'eau ou de neige.

¹⁰⁰Chiffres clés du climat – Edition 2021 – I4CE



**L'effet de serre « anthropique »,
résulte de l'augmentation de la
concentration en GES dans
l'atmosphère du fait des
émissions générées par les
activités humaines¹⁰¹ :**

- Le gaz carbonique (CO₂) d'origine humaine produit par la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) pour l'essentiel mais aussi par certains procédés industriels comme la fabrication du ciment ou de l'acier.
- Le méthane d'origine humaine (CH₄, aussi appelé gaz naturel) produit par la combustion de matière organique comme le bois, par l'élevage des ruminants, par la culture du riz, par la fermentation dans les décharges d'ordures ménagères, par les exploitations pétrolières et gazières et par l'exploitation du charbon. Il faut aussi mentionner que le changement climatique pourrait avoir pour conséquence, en réchauffant le fond de l'océan, de conduire à la désagrégation des hydrates de méthane (piégé sous forme solide comme de la glace) et libérer leur méthane qui partirait dans l'atmosphère. Des quantités importantes de méthane pourraient aussi être libérées par la fonte du pergélisol situé sous des sols aujourd'hui gelés en permanence.¹⁰²
- Les halocarbures¹⁰³ issus de gaz réfrigérants (climatisation, chaînes de froid), de gaz propulseurs dans les bombes aérosols, et dans certains procédés industriels (composant d'ordinateurs, de téléphones, mousse plastique).
- Le protoxyde d'azote (N₂O) qui provient de l'utilisation d'engrais et de certains procédés chimiques.
- L'ozone (O₃) troposphérique¹⁰⁴ est un polluant secondaire, c'est-à-dire qu'il provient de la formation de polluants générés par les activités humaines, comme les automobiles par exemple.
- Les gaz fluorés (CFC, HCFC, PFC, HFC, SF₆, NF₃). Le SF₆, par exemple, était utilisé comme gaz isolant dans les postes de transformation électrique¹⁰⁵.

¹⁰¹https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html

¹⁰²<https://jancovici.com/changement-climatique/risques/faut-il-redouter-les-hydrates-de-methane/>

¹⁰³Il s'agit d'une vaste famille de gaz obtenus en remplaçant, dans une molécule d'hydrocarbure (le propane, le butane, ou encore l'octane, que l'on trouve dans l'essence, sont des hydrocarbures), de l'hydrogène par un gaz halogène (le fluor, le chlore).

¹⁰⁴La troposphère est la couche la plus basse de l'atmosphère, celle qui touche le sol

¹⁰⁵Cet usage est maintenant interdit.

Ces GES ont une durée de vie plus ou moins longue dans l'atmosphère, et un pouvoir de réchauffement de l'atmosphère plus ou moins important par rapport au CO₂ comme cela est expliqué ci-dessous.

DURÉE DE VIE DES GES DANS L'ATMOSPHÈRE : L'ÉQUIVALENT CO₂

L'« équivalent CO₂ » (CO₂eq) est une unité créée par le GIEC¹⁰⁶ pour comparer les impacts de ces différents GES en matière de réchauffement climatique et pouvoir additionner leurs émissions.

Concrètement, l'équivalent CO₂ consiste à attribuer à un GES, pour une période de temps donnée un « Potentiel de Réchauffement Global » (PRG) par rapport au CO₂ qui sert d'étalon (et dont le PRG est donc fixé à 1). Il mesure l'effet de serre estimé d'un GES.

Une des complexités de cet équivalent provient du fait que les différents GES ont des durées de vie différentes dans l'atmosphère. Leur PRG doit donc toujours être apprécié par rapport à une échelle de temps donnée : une tonne de méthane a un PRG de 34 sur une échelle de 100 ans mais de 86 sur une échelle de 20 ans,

compte tenu de sa plus courte durée de vie dans l'atmosphère par rapport au CO₂. Lorsque l'échelle de temps considérée n'est pas précisée dans les bilans d'émissions, elle est fixée « par défaut » à 100 ans.

	20 ans	100 ans	Origine des émissions anthropiques
CO ₂ (GAZ CARBONIQUE)	1	1	Combustion d'énergie fossile, procédés industriels et déforestation tropicale
CH ₄ (MÉTHANE)	86	34	Décharges, agriculture, élevage et procédés industriels
N ₂ O (PROTOXYDE D'AZOTE)	268	298	Agriculture, procédés industriels, utilisation d'engrais
CF ₄ (TETRAFLUORURE DE CARBONE)	4950	7350	Sprays, réfrigération, procédés industriels
HFC-134a	3790	1550	

Figure 3.2 : Potentiel de réchauffement global (CO₂eq) pour des périodes de 20 et 100 ans

Source : IPCC, 2013 : Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.¹⁰⁷

¹⁰⁶Indice introduit dans l'« IPCC First Assessment Report ». <https://klima.com/blog/CO2-vs-CO2e-what-is-the-difference/>

¹⁰⁷https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf

Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA



LA CONCENTRATION EN CARBONE DE L'ATMOSPHERE

Depuis l'époque préindustrielle, la concentration de CO₂ a fortement augmenté dans l'atmosphère en raison des émissions engendrées par l'activité humaine. Ainsi la concentration de CO₂ atmosphérique a augmenté d'environ 277 parties par millions (ppm) à l'ère préindustrielle

à 410 ppm en 2019. Plus de la moitié de cette augmentation des émissions a eu lieu durant les 40 dernières années¹⁰⁸.

Selon le GIEC¹⁰⁹ il est très probable que la fourchette 1,2°-1,9°C sera atteinte par tous les scénarios analysés sur la période 2020-2040, c'est à dire qu'en moyenne le seuil de 1,5° à 1,6°C sera atteint ou franchi sur les 20 prochaines années. Pour la communauté internationale, l'enjeu

est de limiter le réchauffement à 1,5°C d'ici 2100 (ce qui a déjà de lourds impacts) afin d'éviter les scénarios pouvant monter à 2,7°C, 3,6°C voire 4,4°C. Dans un rapport de 2018¹¹⁰, le GIEC a évalué que l'impact d'une trajectoire limitant le réchauffement planétaire à 1,5°C à la fin du XXI^e siècle, nécessiterait de réduire d'environ 45% les émissions d'ici 2030 et amènerait une concentration à 430 ppm d'ici 2100.

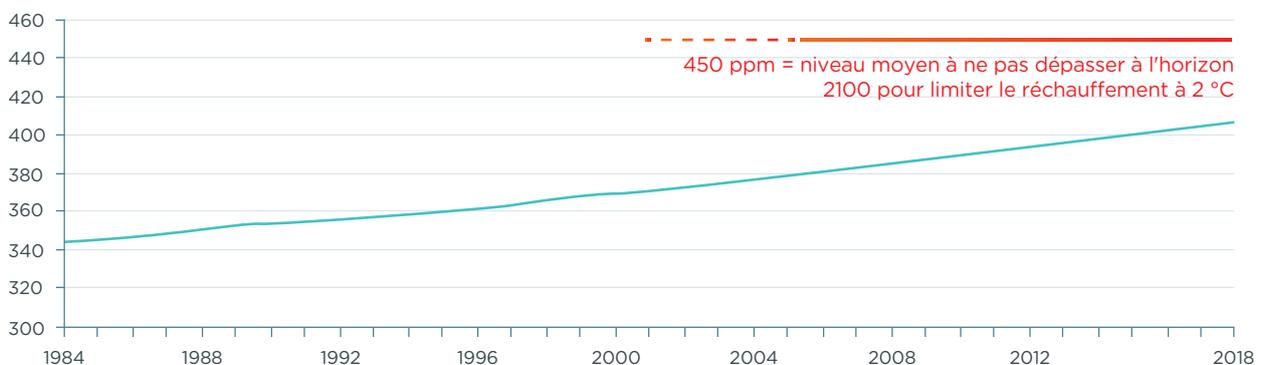


Figure 3.3 : Concentration de CO₂ atmosphérique (en parties par million ppm)
 Source : Datablab d'après le CMDGS sous l'égide de l'OMM 2018

¹⁰⁸Source: NOAA-ESRL; Scripps Institution of Oceanography; Friedlingstein et al 2020; Global Carbon Budget 2020

¹⁰⁹https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

¹¹⁰https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf

3.4

Les réservoirs de carbone

Les réservoirs de carbone (naturels ou artificiels) permettent de stocker le dioxyde de carbone du cycle du carbone et de l'atmosphère. En contribuant à diminuer la quantité de CO₂ atmosphérique, les réservoirs de carbone influent sur le climat planétaire.

Au cours des dix dernières années, sur les 40 Gt de CO₂ libérées en moyenne par an par les activités humaines, l'atmosphère en a absorbé 19, les réservoirs terrestres (biosphère et sols) 12 et les océans 9. L'atmosphère est le réservoir le plus affecté par les activités anthropiques : il a absorbé près de 50 % de la quantité de carbone émise au cours des cinquante dernières années.¹¹¹

¹¹¹<https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/20/presentation.htm>



LES RÉSERVOIRS DE CARBONE NATURELS

Il s'agit essentiellement de la végétation et des océans qui absorbent environ la moitié des émissions humaines de CO₂. Ils participent à la réduction de la présence de GES dans l'atmosphère, limitant ainsi le réchauffement climatique sur la planète.

Les forêts et la végétation

Les plantes terrestres (forêts, bois mort, sols, pelouses, tourbières...) qui absorbent le gaz carbonique grâce à la photosynthèse¹¹² présentent un bilan net de captation d'environ 120 milliards de tonnes de CO₂¹¹³. Les

tourbes – des zones humides avec des résidus végétaux en décomposition – ont un rôle particulièrement intéressant car elles capturent un quart du carbone dans le sol alors qu'elles occupent seulement 3% de la surface terrestre.¹¹⁴

En toute logique, plus de carbone dans l'atmosphère implique une photosynthèse facilitée, pour des plantes qui grandissent donc mieux. Selon une étude parue en 2017¹¹⁵, les plantes ont réussi à s'adapter et à absorber le CO₂, grâce à la photosynthèse, proportionnellement à l'augmentation du carbone sur Terre. Mais les effets du changement climatique, comme les sécheresses entre autres, pourraient perturber ces

interactions entre environnement et plantes et ainsi modifier leurs capacités d'absorption. Il est donc essentiel de prendre des mesures pour protéger les puits naturels de CO₂ dont les forêts et autres zones humides. De nombreux projets sont développés pour préserver voire augmenter les forêts comme puits de carbone (exemple de l'initiative REDD+ soutenue par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture).

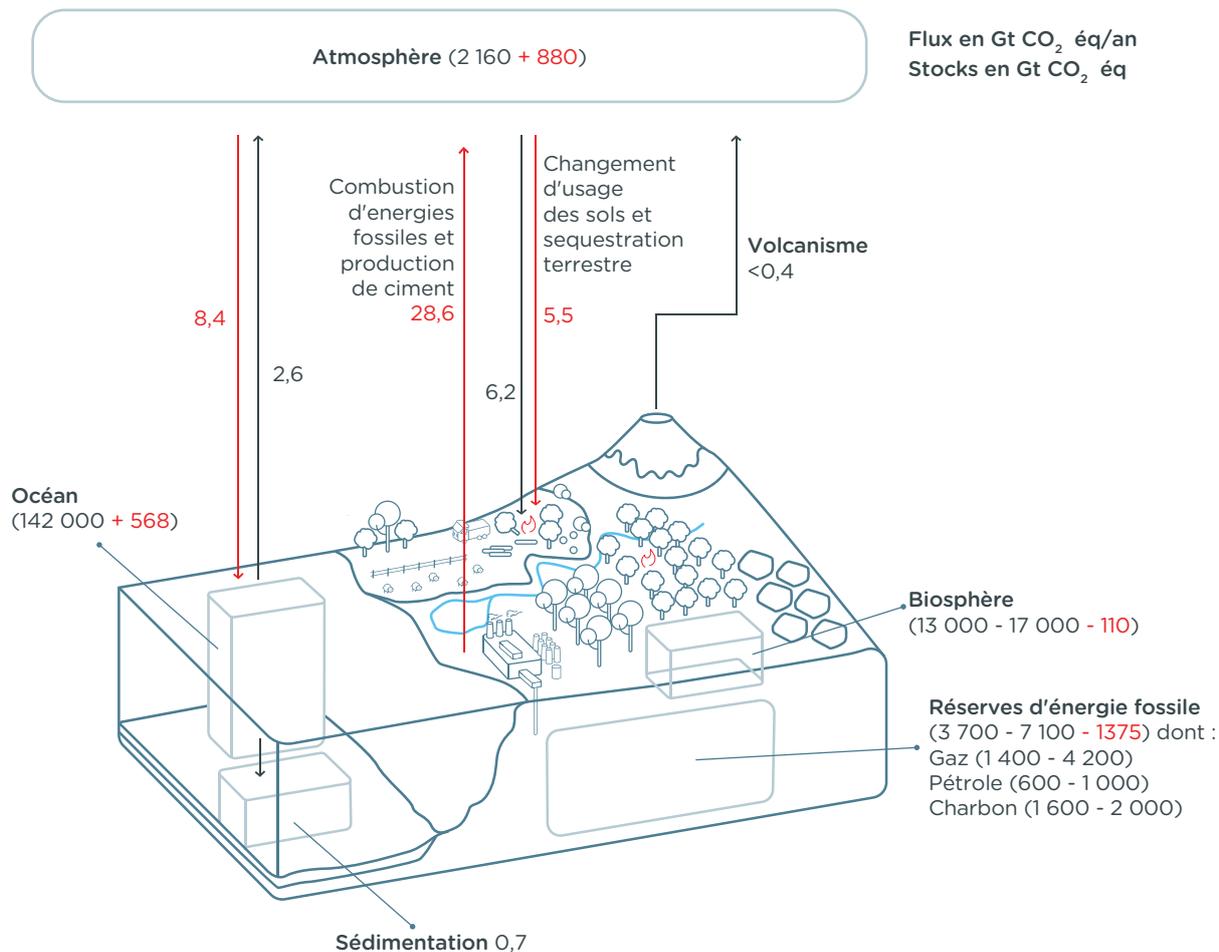
¹¹²<https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/botanique-photosynthese-227/>

¹¹³IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 6

¹¹⁴<https://theconversation.com/peatlands-keep-a-lot-of-carbon-out-of-earths-atmosphere-but-that-could-end-with-warming-and-development-151364>

¹¹⁵<https://www.novethic.fr/actualite/environnement/climat/isr-rse/les-plantes-absorbent-30-du-co2-mondial-mais-cela-pourrait-ne-plus-durer-147297.html>

RÉSERVOIRS ET FLUX DE GES : EXEMPLE DU CYCLE DU CO₂ AU COURS DES ANNÉES 2000



Note :

Ce graphique présente :

i) entre parenthèses, la taille des réservoirs aux temps préindustriels en milliards de tonnes d'équivalent CO₂ en noir et leur variation sur la période 1750-2011 en rouge ;

ii) sous forme de flèches, les flux de carbone entre les réservoirs en milliards de tonnes d'équivalent CO₂ par an. Les flux préindustriels sont en noir. Ceux qui sont liés aux activités anthropiques entre 2000 et 2009 sont en rouge.

Figure 3.4 : Impact des activités humaines sur le cycle du carbone (bilan net en GtCO₂/an au cours des années 2000)

Source : IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 6* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Les océans

Chaque année, près d'un quart du CO₂ émis est absorbé par les océans. Aujourd'hui, l'augmentation des rejets de CO₂ par les activités humaines entraîne deux modifications des masses d'eau :

- D'une part l'acidité des océans qui a augmenté de 30% depuis 1800,
- D'autre part, le changement climatique entraîne un réchauffement des eaux de surface et contribue à réduire la capacité de l'océan à absorber du CO₂ (le CO₂ se dissout mieux dans l'eau froide). De ce fait, plus de CO₂ est absorbé par l'atmosphère, aggravant son impact sur le climat.

La modélisation de ces phénomènes d'absorption naturelle du CO₂ est très complexe et comporte beaucoup d'incertitudes. Il n'en reste pas moins

que les puits naturels tels que forêts et océans n'absorbent qu'environ 50% du CO₂ émis chaque année (au mieux) : le stock de CO₂ va donc continuer à s'accroître chaque année sans actions volontaires et massives pour le réduire. C'est l'objet des politiques climat (voir Chapitre 5)

LES PUIITS DE CARBONE ARTIFICIELS

Les puits de carbone artificiels sont des procédés technologiques qui permettent d'éviter le rejet du CO₂ dans l'atmosphère en grandes quantités, regroupés sous la dénomination Capture, Stockage et Utilisation de CO₂ (CCUS en anglais¹¹⁶). Il s'agit par exemple de capturer le carbone dans une centrale électrique au charbon (ou encore une installation de

combustion, ou une usine de production d'hydrogène à partir de gaz fossile par exemple) ou directement dans l'air (via la technologie en cours de développement « *Direct Air Capture* »), puis de le transporter par pipeline ou voie maritime et de le stocker sous terre dans une cavité saline ou un réservoir de pétrole terrestre ou offshore. La réutilisation du CO₂ dans un procédé qui finit par une combustion et un rejet à l'air libre comme les carburants et gaz synthétiques carbonés diminue efficacement les émissions d'environ 50% d'après l'AIE. Seule la réutilisation du CO₂ capturé qui finit par être séquestré permet d'éviter ou éliminer totalement son rejet à l'atmosphère, par exemple celui qui finit dans des matériaux de construction pour les routes ou simplement le bois pour les bâtiments.



¹¹⁶Voir Chapitre 5 consacré aux leviers d'action pour assurer la transition énergétique.

3.5

Activité humaine et émissions de GES

Les émissions de GES ont atteint, selon les méthodes de calcul, entre 48,9 et 55,3¹¹⁷ milliards de tonnes de CO₂eq en 2018.

¹¹⁷UN Environnement – Emissions Gap Reports 2019 ; données incluant les émissions de GES liées au changement d'usage des sols & World Resources Institute

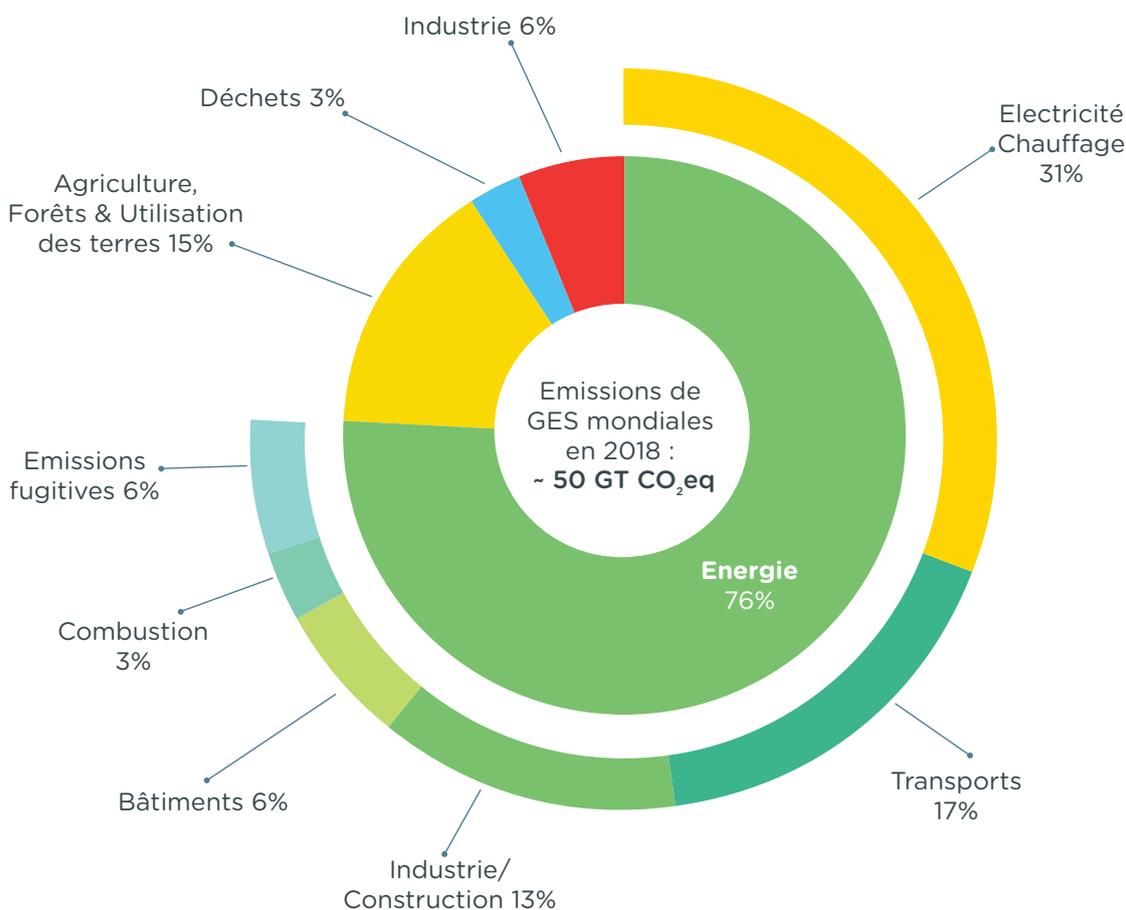


Figure 3.5 : Répartition des émissions de GES par secteur en 2018
Source : Climate Watch, World Resource Institute

ÉMISSIONS DE GES PAR SECTEUR

Les principaux secteurs responsables des émissions de GES sont la consommation d'énergie pour l'industrie, les transports, les bâtiments, la production d'électricité, le chauffage et la climatisation (67%) et l'agriculture notamment du fait des émissions de méthane (15%). Le reste est lié aux processus d'extraction d'hydrocarbures, pétrochimie et production de ciment.

LES ÉMISSIONS DE GES LIÉES À L'ÉNERGIE

L'utilisation de l'énergie représente 76% des émissions mondiales de CO₂eq et l'électricité représente 42% de ces émissions¹¹⁸. L'énergie est donc au cœur des enjeux de réduction des émissions de GES (figure 3.6).

Les sources d'énergie primaire qui émettent des GES (essentiellement du gaz carbonique) sont les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) et la biomasse (si elle n'est pas replantée).

Les sources d'électricité qui émettent peu ou pas de CO₂eq sont le nucléaire, l'hydraulique, le solaire, l'éolien terrestre et les énergies marines. Pour la production de chaleur, ce sont la géothermie et la biomasse si elle est replantée. Notons cependant que même si la source d'électricité ne produit pas de GES, la construction de la « centrale de production » va générer des émissions.

En effet :

- pour construire une centrale (à charbon, nucléaire, à gaz, à pétrole, ou un barrage), il faut des

¹¹⁸<https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>

matériaux de construction (ciment et acier notamment), dont la production engendre des émissions de GES.

- pour construire une éolienne ou un panneau solaire, il faut des matériaux de base (aluminium,

verre, etc.) ou plus élaborés (semi-conducteurs), dont la fabrication émet des GES.

Si l'on intègre ces « émissions indirectes » c'est-à-dire celles générées sur **le cycle de vie**, on obtient la quantité totale de GES émis

pour disposer d'une quantité d'énergie finale donnée.

Le tableau ci-dessous donne les émissions totales sur le cycle de vie des différentes sources d'électricité.

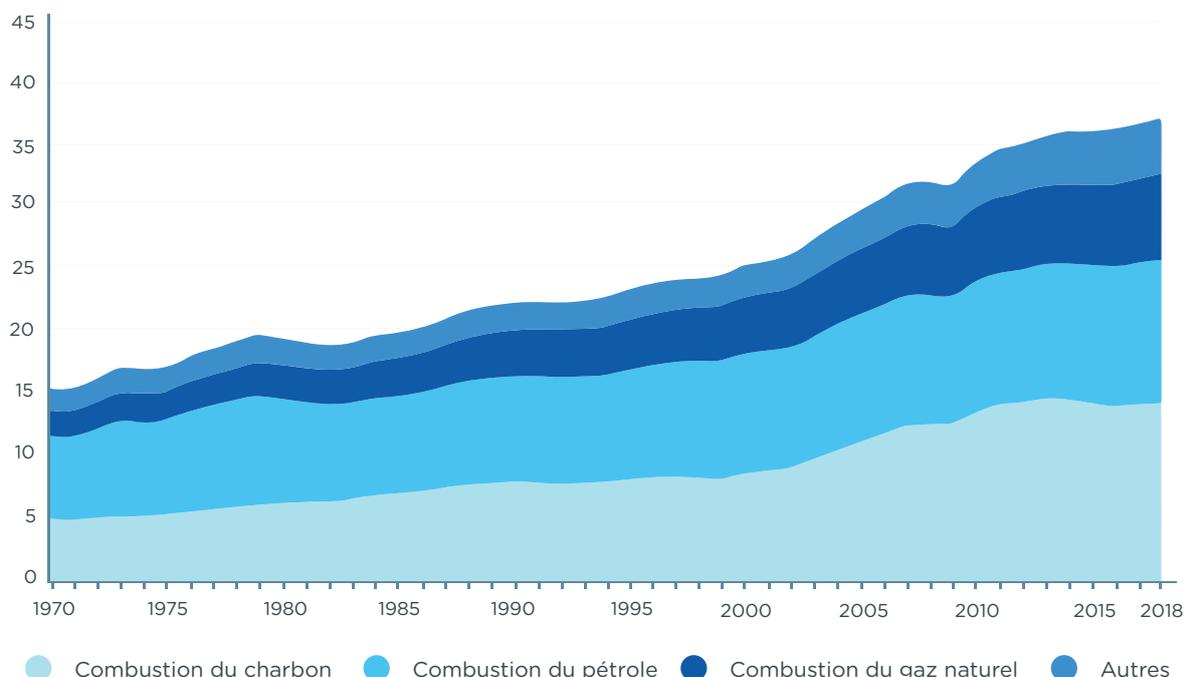


Figure 3.6 : Emissions de CO₂ par combustible dans le monde (en Gt CO₂)

Source : Ministère de la transition écologique – Chiffres-clés du climat 2021 – France, Europe et Monde

SOURCE DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ	VALEUR MOYENNE**
Charbon (chaudière à charbon pulvérisé)	820
Pétrole lourd	778
Gaz cycle combiné	490
Biomasse solide	320
Ferme solaire photovoltaïque	41
Géothermie	38
Hydraulique	24
Nucléaire	12
Eolien maritime	12
Eolien terrestre	11

Figure 3.7 : Emissions de CO₂ équivalent des différentes technologies de production d'électricité (CO₂e/kWh)*

Source : GIEC, Groupe 3, 2014

A noter : *Emissions calculées sur l'ensemble du cycle de vie ** Des valeurs moyennes sont retenues. En effet ces niveaux d'émission varient selon les lieux de fabrication des équipements et des émissions de CO₂ de l'électricité locale utilisée pour les fabriquer

ÉMISSIONS DE GES PAR PAYS

En 2006, la Chine est passée au premier rang des pays émetteurs de CO₂ devant les Etats-Unis. C'est un reflet de sa population grandissante, de l'élévation du niveau de vie moyen, du développement de sa production industrielle (pour sa consommation intérieure et pour l'exportation) et de l'utilisation de combustibles fossiles pour sa production d'électricité. En

Europe, l'Allemagne est le plus gros émetteur de GES en raison de sa dépendance au charbon pour sa production électrique d'après l'Agence Européenne de l'Environnement.

Leurs émissions de GES ramenées au nombre d'habitants donnent un résultat différent et reflètent notamment le niveau et le mode de vie du pays concerné. Les pays du Moyen-Orient et d'Amérique du Nord sont, dans ce cas, les plus émetteurs.

Pour un même type de climat et à niveau de développement équivalent, on pourra noter que certains pays consomment plus d'énergie et émettent plus de GES que d'autres (Amérique du Nord vs. Europe).

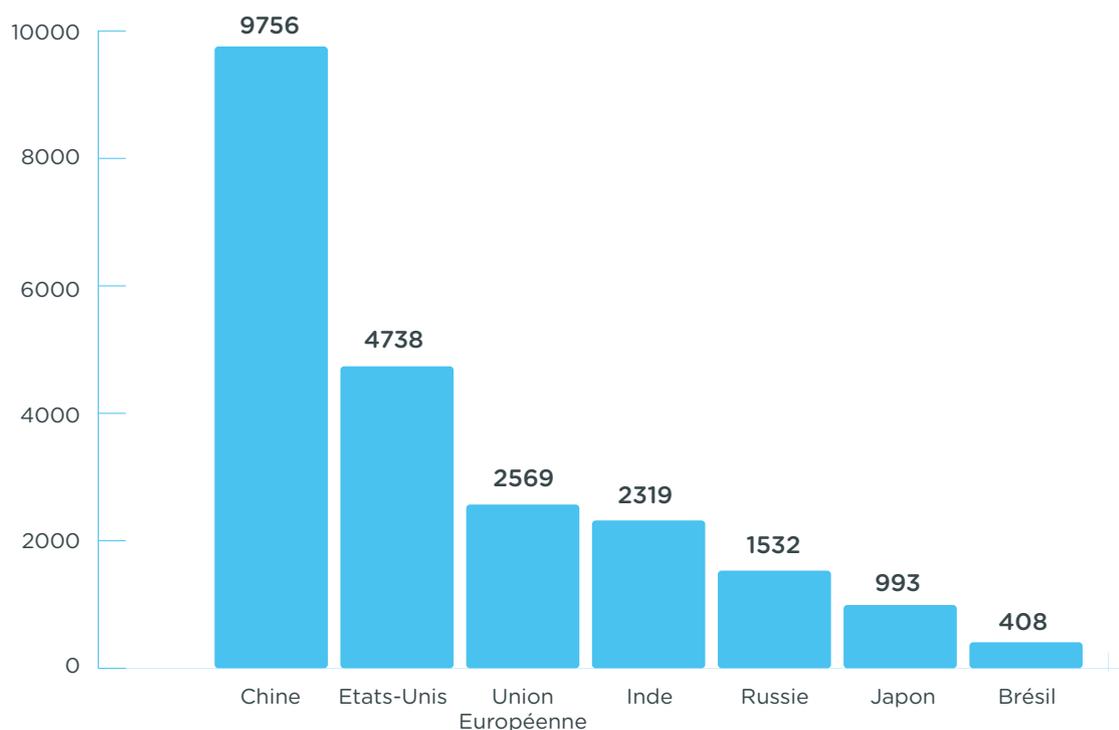


Figure 3.8 : Exemples de pays émetteurs de GES en 2019 (en Mt de CO₂)

Source : Source: IEA (International Energy Agency) (2020) World Energy Outlook 2020, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> All rights reserved.

LES ÉMISSIONS DE CO₂ PAR HABITANT À TRAVERS LE MONDE

Emissions de CO₂ par habitant dans une sélection de pays en 2017 (en tonnes)

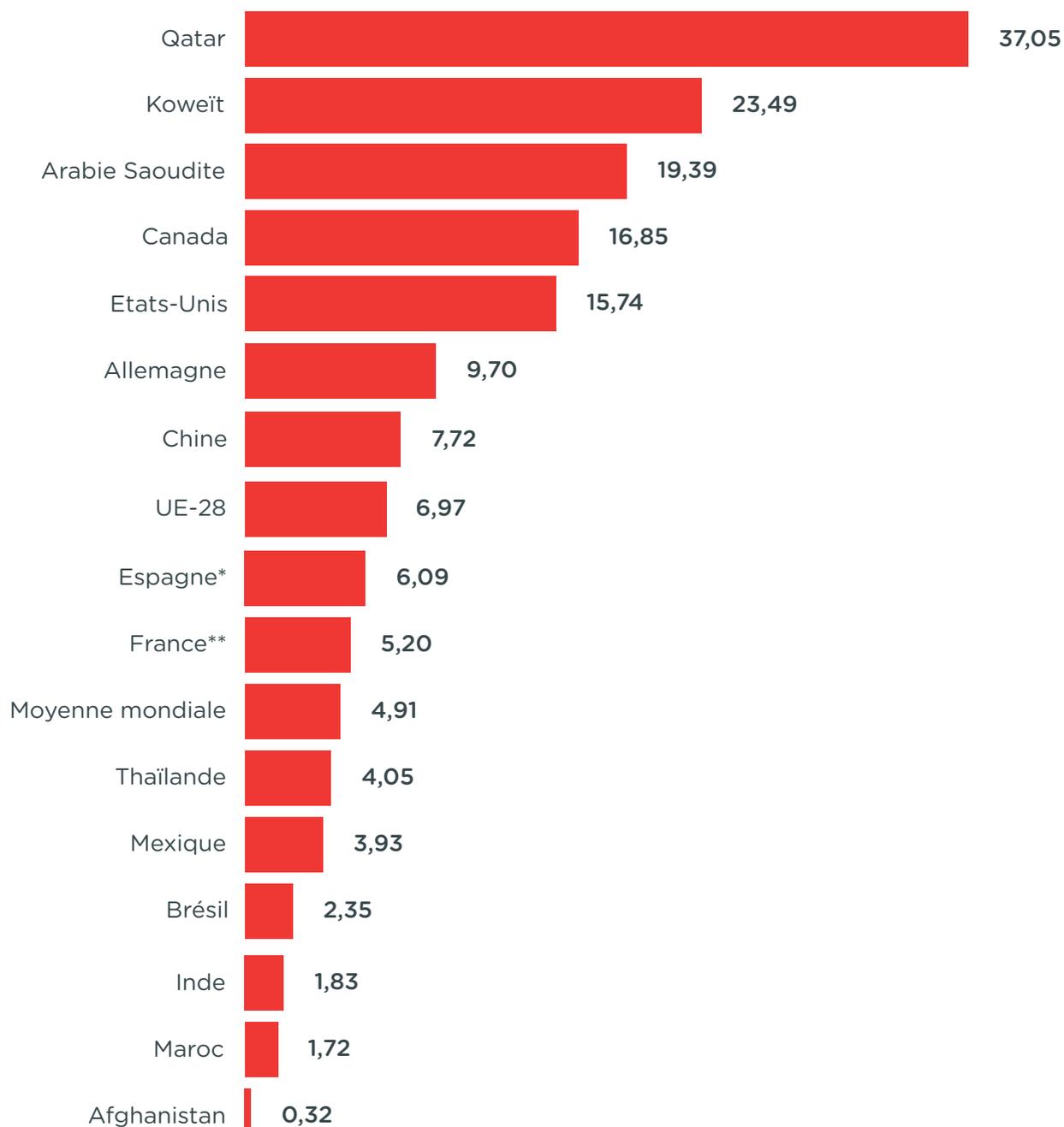


Figure 3.9 : Emissions de CO₂ par habitant à travers le monde (en tonnes de CO₂, par habitant)

Source : Commission Européenne

¹⁹⁹IEA (International Energy Agency) (2020). <https://www.iea.org/news/after-steep-drop-in-early-2020-global-carbon-dioxide-emissions-have-rebounded-strongly>. All rights reserved.

PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES GES

En 2018, les émissions mondiales totales de CO₂eq ont atteint 55,3 milliards de tonnes. En 2020 les émissions de CO₂ ont plongé de 6% suite à la crise de la COVID, la plus grande chute depuis la seconde guerre mondiale d'après l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)¹¹⁹.

Néanmoins la situation est contrastée :

- Les émissions en Chine ont augmenté de 0,8% en 2020, malgré l'arrêt partiel de son économie au début de cette même année. Dans le même temps en Inde, les émissions sont reparties à la hausse du fait de la reprise économique et la hausse de la consommation de produits pétroliers.

- A l'inverse les émissions aux Etats-Unis ont chuté de 10% du fait de la baisse de consommation des produits énergétiques pour le transport et l'industrie.

L'AIE s'attend à une augmentation des émissions pour 2021 mais note que, pour la première fois, des signaux forts donnés par des Etats, leurs plans de relance « verts », les objectifs des entreprises et les mouvements citoyens pourraient conduire à un renversement de tendance.

Cependant, les travaux du Groupe de travail 1 du sixième rapport du GIEC publié en août 2021, qui établit cinq scénarios illustratifs couvrant la gamme des développements possibles des émissions de GES liées aux activités humaines, est moins optimiste.

Les scénarios du GIEC sont basés sur différentes hypothèses concernant les conditions socio-économiques, les niveaux d'atténuation du changement climatique et les contrôles de la pollution atmosphérique.

La variation des émissions de CO₂ (et des autres GES) de 2015 à 2050 dans chacun des scénarios est représentée sur la figure 3.10.

Dans tous les scénarios, les émissions totales de GES conduisent à une augmentation de température au milieu du XXI^e siècle (comparé à la fin du XIX^e siècle). A la fin du XXI^e siècle, cette augmentation varie entre 1°C et 5,7°C selon les scénarios, ce qui amène le GIEC à conclure qu'un réchauffement global de 1,5°C et 2°C sera dépassé au cours du XXI^e siècle à moins que de fortes réductions de GES se produisent dans les prochaines décennies.

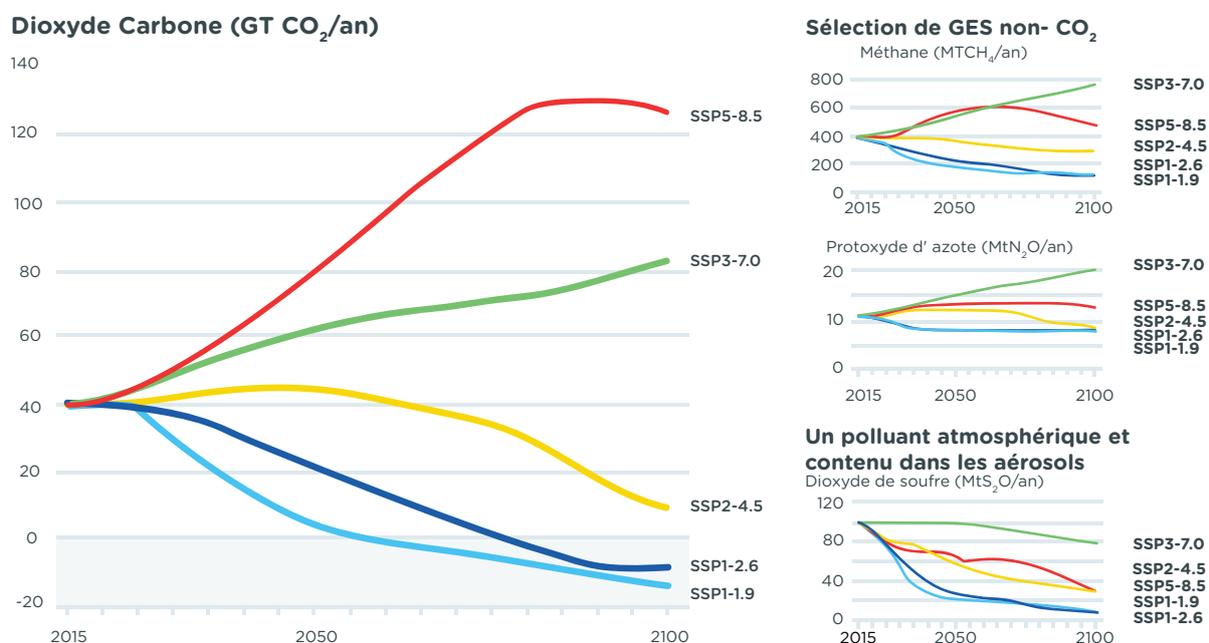


Figure 3.10 : Les 5 scénarios d'évolutions des émissions de CO₂ proposés par le GIEC

Source : IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Le réchauffement climatique est un enjeu majeur du XXI^e siècle et son lien avec la demande d'énergie est indéniable.

Limiter le réchauffement global de la planète passera par des efforts à consentir au plus vite sur la réduction des émissions de GES mais aussi par leur captage et leur séquestration.

A mi-2021, les pays représentant 70% des émissions de CO₂eq avaient ou étaient sur le point de mettre en œuvre des lois visant la neutralité carbone d'après l'analyse de l'AIE.¹²⁰

¹²⁰IEA Source : IEA (International Energy Agency) (2020) Net Zero by 2050 - A roadmap for the global Energy Sector, May 2021. All rights reserved. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>





4

La comparaison des énergies

4.1

Introduction

Comparer les énergies est moins simple qu'il n'y paraît.

Dans de nombreux rapports sur l'énergie, les énergies sont comparées entre elles selon la quantité d'énergie primaire nécessaire à leur production. Ce faisant, les caractéristiques de ces énergies et leurs usages différenciés ne sont pas pris en compte.

Les énergies primaires sont directement issues de ressources naturelles : énergies fossiles ou liées au soleil - qui évapore l'eau, réchauffe et déplace l'air, nourrit la biosphère ou est directement transformé en énergie (solaire, éolien, biomasse, hydraulique...). Quand elles sont transformées elles deviennent des énergies secondaires (comme l'électricité par exemple).

Dans le passé, l'électricité était produite seulement à partir de combustibles fossiles. Tout naturellement donc, pour convertir une certaine quantité d'électricité (énergie secondaire) en énergie primaire, on se référait à la quantité d'énergie fossile (énergie primaire) nécessaire pour la produire dans une centrale brûlant ce combustible fossile. Cette méthode a été conservée avec l'apparition de l'électricité nucléaire dans les années 1970 bien que l'origine de ces énergies soit totalement différente. En effet, dans une centrale nucléaire, c'est la réaction nucléaire au sein du combustible à base d'uranium, qui produit de l'énergie sous forme de chaleur. Cette énergie calorifique va chauffer de l'eau comme l'énergie calorifique issue de la combustion de gaz par exemple.¹²¹

¹²¹Cette vapeur d'eau permet de faire tourner un alternateur qui produit de l'électricité.



La production d'électricité hydraulique est liée à l'énergie mécanique engendrée par la chute d'eau et ne passe pas par l'étape d'énergie calorifique. Vouloir la convertir en énergie primaire de type fossile devient plus difficile à justifier. Avec l'augmentation de l'électricité d'origine renouvelable (solaire, éolienne), cette difficulté s'est accentuée et selon les sources, les méthodes de conversions ne sont pas toujours les mêmes (voir « **Pour aller plus loin** »).

La lutte contre le changement climatique nécessite de recourir à des technologies de production d'énergie à faibles émissions de GES afin de limiter leur concentration dans l'atmosphère, facteur clé du réchauffement climatique (voir Chapitre 3). Ces technologies de production d'énergie bas carbone ont

des caractéristiques très différentes des solutions reposant sur les combustibles fossiles et leur comparaison nécessite de prendre en compte de nombreux paramètres.

En outre, la comparaison des énergies nécessite de pouvoir les convertir dans une même unité. Cette approche est largement utilisée dans les statistiques internationales qui évaluent les ressources énergétiques au niveau planétaire, par pays ou par grands acteurs de l'énergie. L'évolution de ces ressources est scrutée de près, notamment pour évaluer l'indépendance énergétique d'un pays.

Le chapitre 1 a permis de décrire les différentes formes d'énergie et de qualifier leur niveau de maturité technologique et économique. Le

chapitre 2 a présenté le rôle de chacune de ces solutions au regard des types de consommation en énergie.

Dans ce chapitre 4, il s'agit d'étudier comment ces solutions se comparent entre elles. Cela permettra aussi d'analyser dans quelle mesure elles peuvent être complémentaires pour répondre à l'objectif de décarbonation.

La comparaison doit prendre en compte, à la fois leurs propriétés intrinsèques (densité énergétique, empreinte au sol, coût, potentiel de décarbonation) ainsi que les contraintes imposées par les modes de fonctionnement du système énergétique.

4.2

Caractéristiques des énergies



A équivalence de contenu énergétique, les différentes formes d'énergie ont des caractéristiques différentes (voir Chapitres 1 et 2).

Nous les analysons selon les paramètres suivants :

- **La densité énergétique :** il s'agit de l'énergie que l'on peut produire avec 1kg de la ressource s'il s'agit de combustibles fossiles ou d'uranium (utilisé pour la production d'électricité nucléaire) ou la quantité d'énergie que l'on peut produire sur une surface donnée (solaire, éolien, biomasse) ou avec un volume donné.
- **L'abondance :** pour les combustibles fossiles, elle se mesure en général en années de consommation future sachant que cette mesure très facilement compréhensible est en fait complexe car les tendances de consommation évoluent, avec

aujourd'hui un souci d'efficacité énergétique dans le monde occidental et le recul progressif de certaines formes d'énergie comme le charbon par exemple. Du côté de la ressource, celle-ci dépend des efforts d'exploration et du prix de revient pour l'extraire. Si le prix de marché prévu est faible par rapport au coût d'extraction, la ressource sera laissée en terre.

- **La disponibilité :** cette caractéristique s'applique notamment pour la production d'électricité. Des énergies intermittentes comme le soleil et le vent ne sont pas disponibles tout le temps. Lorsque leur part dans le mix électrique¹²² devient trop importante, cela pose un problème d'équilibrage du réseau qui doit à chaque instant équilibrer la demande d'électricité par nature variable (on ne consomme pas les mêmes quantités d'électricité en été et en hiver à cause du chauffage électrique et de la climatisation par

exemple) avec la production d'électricité. Quand l'équilibrage du réseau n'est plus assuré, la sécurité d'approvisionnement électrique peut être menacée.

- **L'impact sur l'environnement :** il s'agit à la fois de la pollution terrestre, des eaux et également l'émission de GES (notamment CO₂ et CH₄) qui concourent au réchauffement de notre planète.

¹²²Le mix électrique est caractérisé par le pourcentage des différentes formes d'énergie dans la production d'électricité

LA DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

Pour les formes d'énergie qui ont une masse, la densité énergétique s'exprime en nombre de mégajoules¹²³ par kilogramme. La figure 4.1 ci-dessous compare la densité énergétique des principales formes d'énergie :

- **L'uranium** a une très forte densité énergétique. Ainsi 1 kg d'uranium naturel permet de générer autant d'électricité que 13 tonnes de pétrole consommées dans une centrale électrique thermique.¹²⁴

- Le **pétrole** a également une densité énergétique élevée : un litre de fioul contient une énergie de 10 kWh, soit la même énergie qu'un mètre cube (m³) de gaz naturel¹²⁵ ou la production d'une installation de 50 m² de panneaux solaires pendant une heure.¹²⁶

En effet, pour l'électricité, la densité énergétique peut s'exprimer en quantité d'énergie par surface immobilisée :

- La densité énergétique du **solaire** est comparativement faible. A Bordeaux avec 10 m² de panneaux

solaires, on ne produit que 4 kWh par jour (la consommation électrique moyenne journalière d'un ménage en France est de 12,5 kWh). En France, il faudrait couvrir les toits d'une surface équivalente à celle de la ville de Paris pour disposer de la même puissance électrique qu'une centrale nucléaire de 1000 MW, tout en étant intermittente. L'énergie produite dépend de l'ensoleillement : au Maroc on peut produire la même quantité d'énergie annuelle avec une surface deux fois moindre.¹²⁷

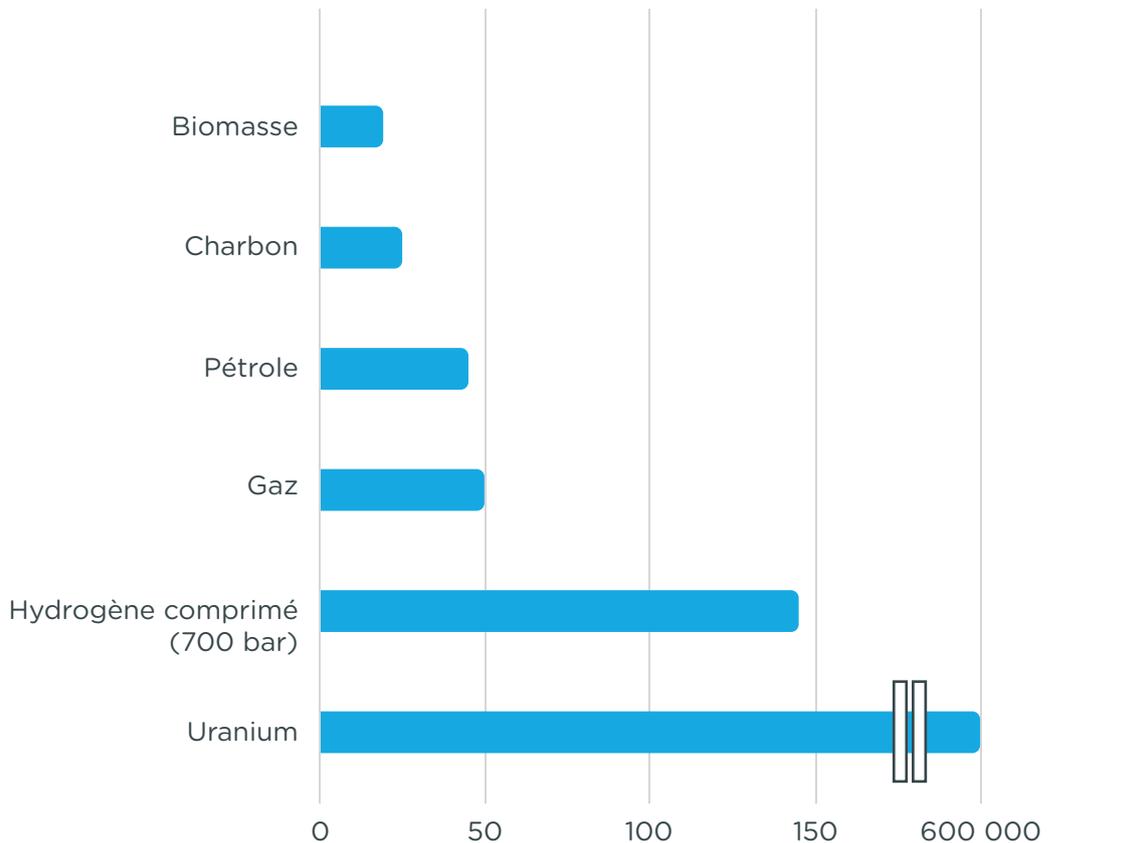


Figure 4.1 : Densité énergétique des principales énergies (MJ/kg)

Source : Analyse Capgemini

A noter : Le graphe ne contient pas l'électricité intermittente qui est une énergie finale et qui n'a pas de masse.

¹²³Voir définition de l'unité joule au Chapitre 1

¹²⁴https://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-ppe/file/1562/reserves_uranium.pdf : 175 tonnes d'uranium naturel par an pour 1000 MW_e et une production d'électricité de 7 TWh annuels.

¹²⁵A la pression et à la température standard

¹²⁶Lorsque le ciel est dégagé et que le soleil brille perpendiculairement à sa surface

¹²⁷Analyse Capgemini



DISPONIBILITÉ ET IMPACT DE L'INTERMITTENCE SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Le réseau électrique doit être équilibré en permanence

L'électricité a une contrainte forte comparée à d'autres formes d'énergie car elle se stocke difficilement. À tout moment la production d'électricité doit être égale à la consommation d'électricité sous peine de voir le réseau électrique s'effondrer. Les conséquences peuvent être désastreuses comme l'a montré la panne géante de 2003 sur la côte Est des États-Unis qui a coûté 6 milliards de dollars à l'économie américaine.¹²⁸

C'est le rôle du gestionnaire de réseau de s'assurer en permanence de cet équilibre en faisant appel aux centrales de production, en utilisant les moyens de stockage (notamment

hydraulique), en important de l'électricité si nécessaire, en mobilisant (et en rémunérant) les différentes parties prenantes susceptibles de contribuer à l'équilibrage du réseau électrique.¹²⁹ Les consommateurs peuvent être mobilisés soit grâce à des tarifs les incitant à ne pas consommer à la pointe de la demande, au moment où l'équilibrage est le plus difficile (tarifs dynamiques)¹³⁰, soit en cas de jours très tendus par des alertes (exemple Ecowatt¹³¹ en France) leur demandant de reporter leur consommation des heures de pointe vers d'autres moments de la journée (effacement). Pour encourager le développement de l'effacement, notamment chez les particuliers, l'Union Européenne impose à partir de 2021, aux fournisseurs d'électricité de proposer au moins une offre à tarif dynamique à leurs clients.¹³²

Dans les pays développés, la production électrique est assurée principalement par des centrales qui fonctionnent en continu ou « base » (nucléaire, charbon, fil de l'eau,

cogénération, gaz) et des solutions de pointe (diesel, gaz, barrages hydrauliques, batteries) qui interviennent ponctuellement - la durée varie de quelques secondes à quelques heures. L'augmentation de la part des énergies renouvelables intermittentes dans le mix électrique rend cet équilibrage plus difficile. La recharge des voitures électriques est un problème nouveau que les gestionnaires de réseau doivent prendre en compte.¹³³ Il faut néanmoins reconnaître que les véhicules électriques constituent aussi un moyen potentiel de stockage massif d'électricité et pourraient contribuer à améliorer la gestion du réseau si celui-ci était adapté en conséquence.

Dans les pays en voie de développement où la demande est souvent supérieure à la production d'électricité disponible, l'opérateur procède à des délestages, c'est-à-dire des interruptions de courant ciblées.

¹²⁸Soult, F. (2003). EDF : chronique d'un désastre inéluctable (Documents, Actualités, Société) (French Edition) (0 éd.). CALMANN-LEVY.

¹²⁹<https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/la-flexibilite>

¹³⁰<https://www.essentialenergy.com.au/-/media/Project/EssentialEnergy/Website/Files/Our-Network/TimeofUseBrochure.pdf>

¹³¹<https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/la-flexibilite>

¹³²<https://www.sia-partners.com/fr/actualites-et-publications/de-nos-experts/nouvelle-obligation-europeenne-doffre-tarifation>

¹³³<https://www.capgemini.com/fr-fr/etudes/wemo2020/>

Intermittence et comparaison du facteur de charge par technologie de production

Depuis le début des années 2010, la part des énergies renouvelables augmente fortement dans la production électrique dans le monde entraînant donc de nouvelles contraintes pour le réseau :

- En période de surproduction, les moyens de stockage de l'électricité étant limités, afin de ne pas faire disjoncter les lignes électriques, l'opérateur de réseau peut imposer la réduction ou la déconnexion de certains moyens de production. Cette réduction (*curtailment*¹³⁴ en anglais) est pratiquée couramment dans certaines régions qui ont un excès de production éolienne.

- En période de sous-production, l'opérateur de réseau doit compenser le déséquilibre grâce à des mécanismes de flexibilité (centrales de production additionnelles, effacement, interconnexions, stockage). Ces autres moyens appelés en renfort (les centrales au gaz par exemple) entraînent des émissions de GES.

Le facteur de charge (*capacity factor*) d'une unité de production électrique (d'une éolienne par exemple) est le ratio entre l'énergie qu'elle produit sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite durant cette période si elle avait constamment fonctionné à puissance nominale. Pour les renouvelables, le facteur de charge donne une indication de leur intermittence : il n'est pas choisi mais imposé par les conditions météorologiques. Pour d'autres

moyens de production, le facteur de charge est choisi ou piloté en fonction de l'intérêt économique à faire tourner la centrale ou non. C'est notamment le cas du gaz qui est un moyen très facile à piloter.

Le tableau ci-dessous reprend les facteurs de charge observés en moyenne par technologie dans le monde.

TECHNOLOGIE	FACTEUR DE CHARGE THÉORIQUE (PRODUCTION EN BASE)
Nucléaire	>90%
Géothermie	80 - 90%
Biomasse	70 - 80%
Hydroélectricité	40 - 50%
Charbon	70 - 80%
Gaz	70 - 80%
Solaire thermique	40 - 50%
Eolien maritime	35 - 50%
Eolien terrestre	20 - 35%
Solaire photovoltaïque	12 - 20%

Figure 4.2 : Comparaison des facteurs de charge par technologie de production d'électricité
Source : IRENA, US DOE, AIE

¹³⁴<https://physicsworld.com/a/curtailment-losing-green-power/>

Le facteur de charge change en permanence pour l'ensemble des technologies en fonction de nombreux paramètres : météorologiques, niveau de la demande, disponibilité des équipements, période de maintenance. **Voici quelques exemples de lien entre conditions climatiques et niveau de production d'électricité :**

- La production d'électricité éolienne est plus forte en hiver, ce qui aide dans les pays dépendant du chauffage électrique.

- Les épisodes de sécheresse entraînent une diminution de la production hydraulique (exemple du Brésil) et aussi celle des centrales nucléaires en bord de rivière¹³⁵.
- En Allemagne, la circulation des barges de charbon dépend de la navigabilité des fleuves et la production des centrales au charbon peut être interrompue du fait du manque d'approvisionnement.¹³⁶

Assembler les différentes technologies de production électrique doit tenir compte de leur facteur de charge. La disponibilité de centrales solaires (qui ne fonctionnent pas la nuit) doit être complétée par celle d'une centrale nucléaire flexible ou à gaz - sauf à y adjoindre des solutions de stockage massif. Ces considérations sont indispensables lorsque l'on réalise que l'énergie ainsi générée alimente des secteurs indispensables et critiques comme le secteur médical qui ne peut pas se satisfaire de fournitures intermittentes.



¹³⁵https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/impact-secheresse-centrale/Pages/Impact-secheresse-fonctionnement-centrales.aspx#.YG8jxK8zY2w

¹³⁶<https://www.montelnews.com/en/story/coal-barges-face-rhine-closures-as-river-levels-swell/1190401>

4.3

Comment comparer le coût des énergies entre elles ?

La comparaison du coût des énergies fait sens dès lors que l'on compare des énergies qui répondent au même usage final. On peut par exemple comparer le coût pour 100 km parcourus d'un véhicule thermique et d'un véhicule électrique. On peut aussi comparer deux sources d'électricité sous réserve qu'elles aient été rendues homogènes en termes de disponibilité (facteur de charge).

Cependant, grâce aux conventions de conversion d'énergie secondaire en énergie primaire expliquées dans la section « **Pour aller plus loin** », on peut arriver à une comparaison (notionnelle) des énergies en Mega Joules et en coût.



COMPARAISON DES COÛTS MOYENS DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Les coûts liés aux divers moyens de production d'électricité sont très différents. Pour pouvoir les comparer, il faut prendre en compte le rythme auquel les dépenses seront faites dans le temps, la durée de vie et la quantité d'électricité produite, qui dépend du facteur de charge. Par exemple, les réacteurs nucléaires, dont le temps de construction est élevé, nécessitent des investissements très importants, mais le coût du combustible est relativement faible. C'est l'inverse

pour les centrales brûlant des combustibles fossiles dont l'investissement est plus faible mais dont le coût du combustible est relativement plus élevé. Pour les énergies renouvelables le combustible est gratuit mais il y a un coût d'investissement initial important.

Les économistes et les ingénieurs qui développent des projets utilisent depuis très longtemps la notion d'actualisation qui permet d'évaluer un bien ou un service à différents moments dans le temps. Elle repose sur un taux d'actualisation annuel¹³⁷ qui tient compte notamment du coût du capital et des risques encourus. Le calcul du coût de production est

très sensible au taux d'actualisation retenu, généralement entre 5 et 10%.

Ainsi, pour comparer le coût de l'électricité produite par ces différentes sources, on évalue le coût de production tout au long de la durée de vie de la centrale (notamment coût de construction, coût du combustible, coût de maintenance) et on actualise ces coûts.

Ces coûts actualisés sont ensuite divisés par les quantités d'électricité produite durant la vie de la centrale, elles aussi actualisées¹³⁸. C'est la méthode du coût moyen actualisé de production de l'électricité exprimé en €/kWh (ou en anglais *levelized cost of energy* noté LCOE).

¹³⁷Le taux d'actualisation est utilisé pour escompter un flux futur et calculer sa valeur actuelle équivalente. Ainsi 100€ en 2020 aura une valeur équivalente différente du fait du taux d'actualisation. Ce taux dépend de l'inflation, du niveau de risque, du coût de la dette et du coût du capital

¹³⁸<https://www.connaissancedesenergies.org/quest-ce-que-le-lcoe-170908>

On obtient les résultats décrits dans le graphique de la figure 4.3. Cependant cela reste une notion très théorique et elle n'est pas totalement suffisante pour la comparaison car elle ne reflète pas l'ensemble des externalités (en particulier le coût de stockage pour les renouvelables, le coût de renforcement des réseaux, le coût de fin vie pour le nucléaire, l'impact sur la biodiversité et les paysages) ni le fait que la production puisse être ajustée à la demande en

temps réel¹³⁹. On ne peut en effet pas totalement comparer directement un MWh produit par un moyen de production pilotable (gaz, charbon, nucléaire, hydraulique) avec un MWh de production dont la disponibilité n'est pas le résultat d'un choix (i.e. éolien, photovoltaïque).

Par ailleurs l'analyse LCOE ci-dessous ne prend pas en compte le surcoût lié au prix du carbone (soit via une taxe, soit via l'achat de quotas

d'émissions), qui impacte uniquement la production électrique à partir de charbon et de gaz. Par exemple si on prend le prix de l'ETS actuel à 50 €/tCO₂¹⁴⁰ alors le LCOE augmenterait d'environ 50 €/MWh pour le charbon et de 22 €/MWh pour le gaz.

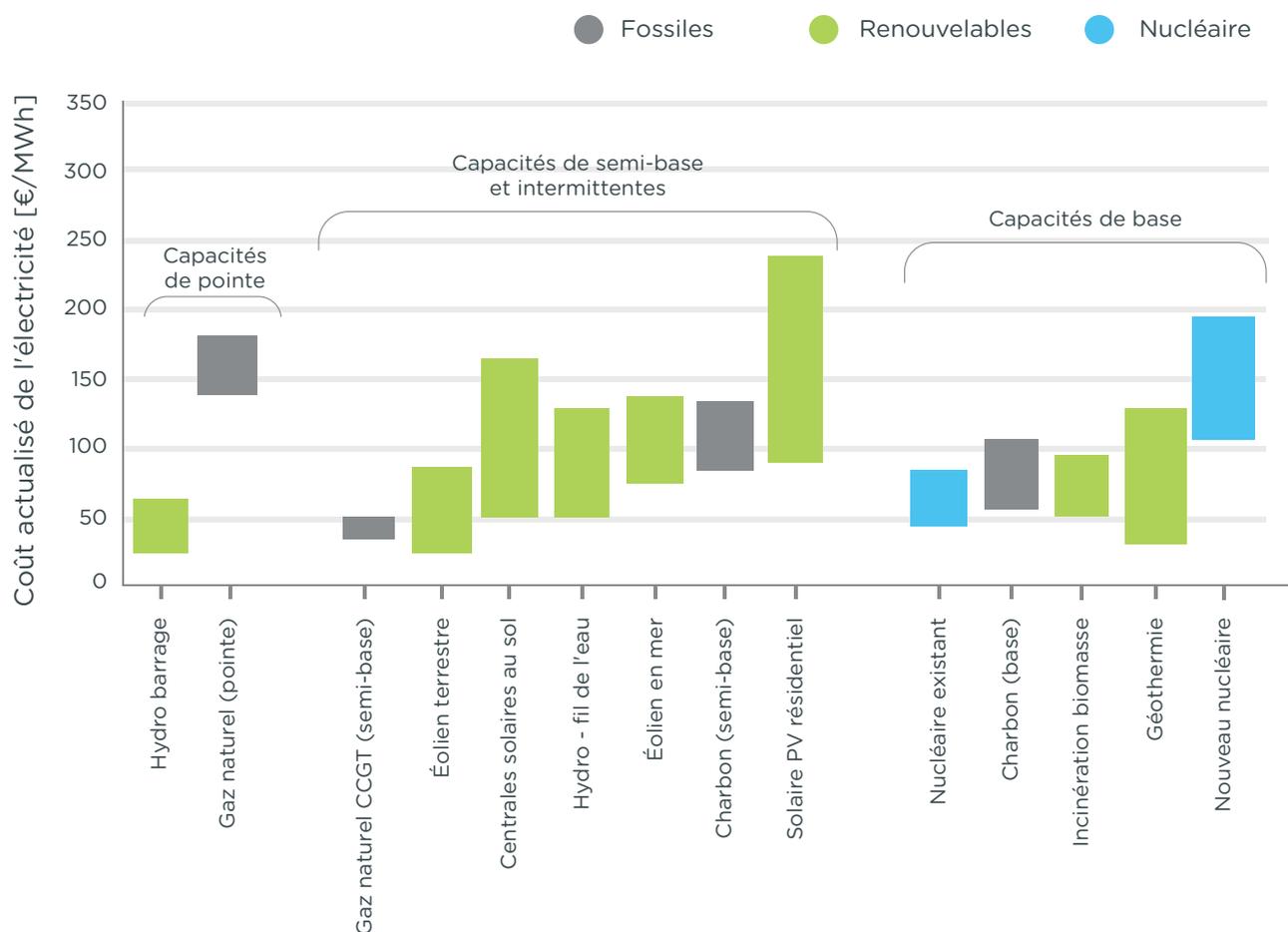


Figure 4.3 : Coûts moyens actualisés de l'électricité pour 2019 en Europe (hors prix carbone)

Source : Capgemini WEMO 2020

¹³⁹https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/les-couts-lisses-de-l-electricite-774441.html?amp=1&__twitter_impression=true

¹⁴⁰<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-05-13/germany-signals-record-eu-carbon-price-rally-may-slow-down>

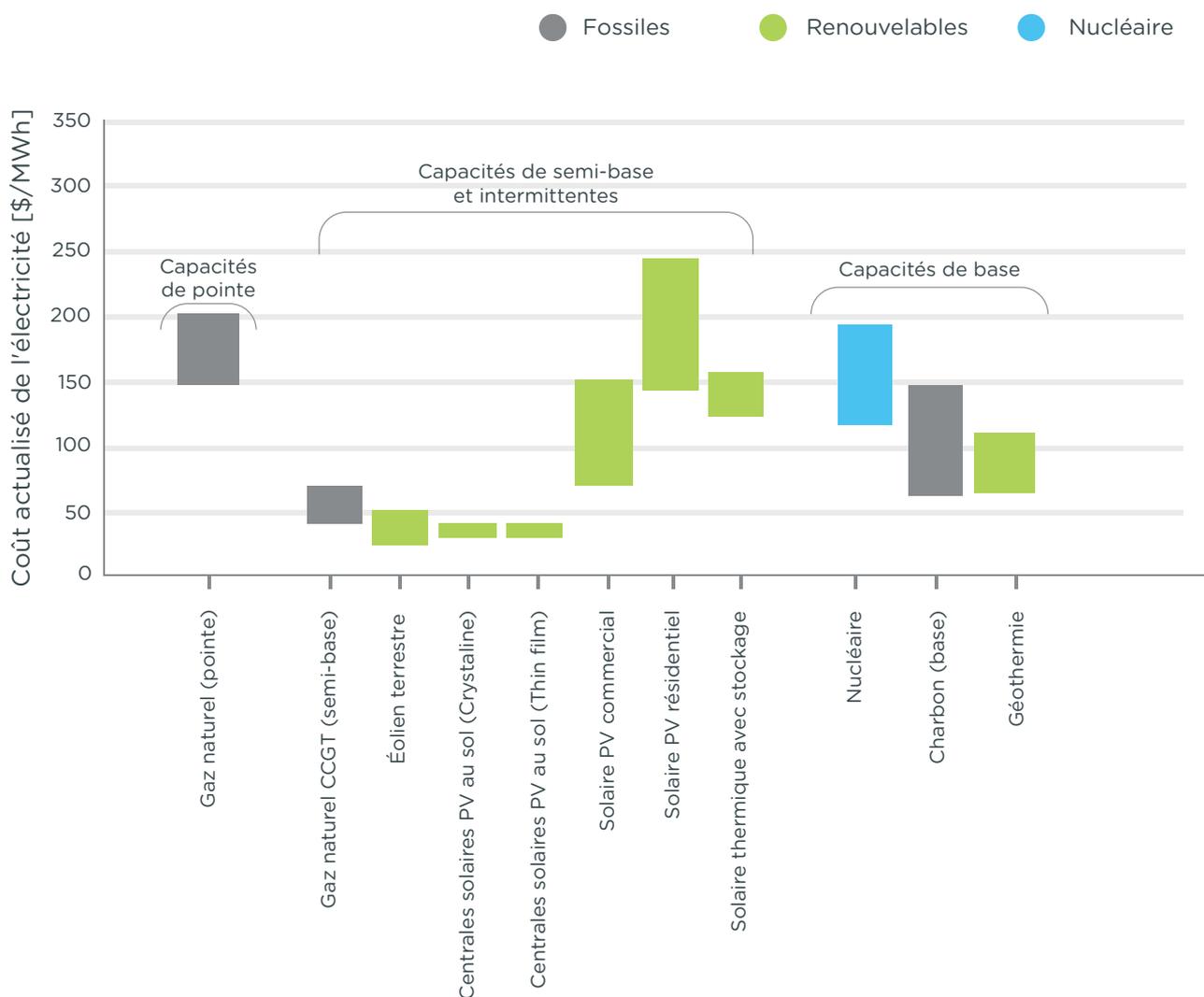


Figure 4.4 : Coûts moyens actualisés de l'électricité aux Etats-Unis en 2019 (hors prix du carbone)

Source : Capgemini WEMO 2020

A noter : Les centrales au gaz fonctionnent différemment en fonction des conditions de marché et des technologies de production. « Peak » correspond à un fonctionnement de quelques semaines voire quelques jours par an, ce qui correspond à un facteur de charge effectif de 10-20%. Dans les pays à forte production d'électricité renouvelable comme le Royaume-Uni, les centrales à gaz ne fonctionnent pas en permanence et on parle de « semi-base », ce qui correspond à un facteur de charge effectif de 50-60% vs. un facteur de charge théorique à 85%. En Europe en moyenne les centrales à cycle combiné à gaz fonctionnent à environ 40 à 50% du fait des conditions de marché d'après les données BNEF.

COMPARAISON DES COÛTS DE L'ÉNERGIE POUR LE TRANSPORT TERRESTRE

La comparaison des coûts dans le cas du transport de véhicules est complexe car il faut prendre en compte l'ensemble des étapes en partant de la production d'énergie jusqu'à son utilisation. Le nombre de transformations et l'efficacité à chaque étape de transformation vont être déterminants pour comprendre le coût.

Il y a très peu d'étapes de transformation dans le cas d'un véhicule purement électrique, ce qui explique que le rendement global de la production à l'utilisation est supérieur à celui du véhicule hydrogène. Selon une étude du centre de recherche britannique Transport & Environment (T&E), le rendement est ainsi de 73% pour un véhicule électrique contre 22% pour un véhicule roulant avec une pile à combustible et 13% dans le cas d'un véhicule utilisant un carburant synthétique (voir Chapitre 2 sur la description des types de carburants).

Dans le cas d'un véhicule fonctionnant à l'aide d'un moteur thermique alimenté à l'essence ou au gazole, le rendement est de l'ordre de 26 à 42%¹⁴¹

Par exemple le coût d'utilisation sur la durée de vie totale (coût d'achat, du carburant et de maintenance) d'un camion roulant à la pile à combustible en 2030 est estimé selon T&E à 459 000 € contre 393 000 € pour un véhicule électrique.

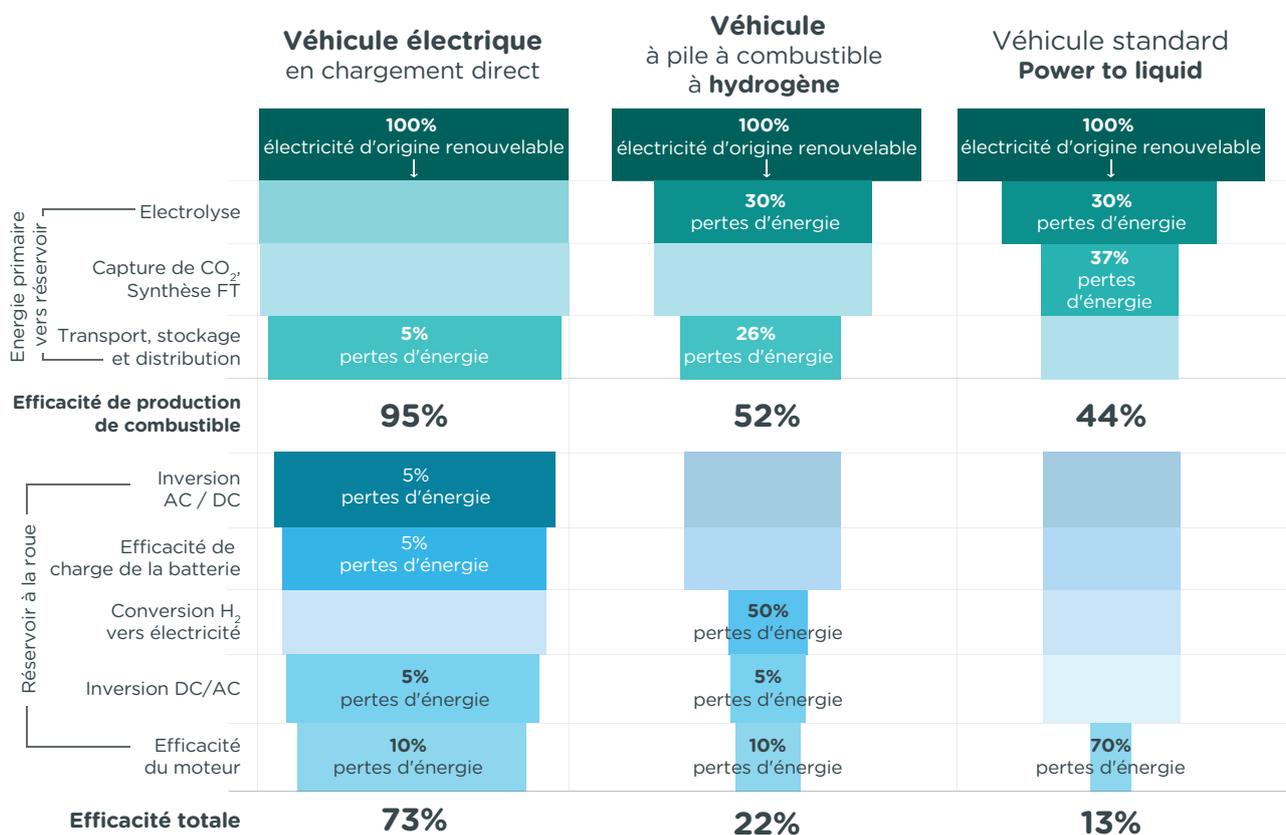


Figure 4.5 : Comparaison des rendements de véhicules : véhicule électrique, véhicule à hydrogène et véhicule à carburant synthétique

Source : Centre de recherche britannique « UK Transport & Environment »

A noter : Le rendement pour un véhicule thermique est d'environ 36 à 42% en conditions optimales et est réduit à 15% en agglomération

¹⁴¹<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/transports/les-vehicules-essence-et-diesel>



POUR ALLER PLUS LOIN – QUELLES MÉTHODOLOGIES POUR CONVERTIR DES ÉNERGIES AYANT DES PROPRIÉTÉS ET DES MESURES DIFFÉRENTES ?

Il existe deux grandes méthodes qui peuvent être utilisées pour calculer l'équivalent en énergie primaire des sources d'énergie au niveau d'un pays : la méthode dite de substitution partielle et la méthode du contenu énergétique physique. La part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement énergétique total apparaîtra différemment selon la méthode utilisée car elles diffèrent notamment dans le traitement de l'électricité d'origine solaire, hydraulique, éolienne. Il est donc important de comprendre les conventions sous-jacentes qui ont été utilisées pour calculer les bilans d'énergie primaire.

La méthode de substitution partielle

Cette méthode s'intéresse aux quantités d'énergie qu'il faudrait importer ou produire sous forme d'énergies fossiles ou minières (uranium) si l'ensemble de la consommation ou de la production était sous cette forme. Typiquement pour l'électricité, elle calcule la quantité d'énergie primaire fossile qui serait nécessaire pour produire une quantité identique d'électricité dans les centrales thermiques conventionnelles (d'où le nom de méthode de substitution). On divise donc la quantité d'électricité finale par R , le rendement moyen des centrales à combustible fossile¹⁴², ou ce qui revient au même, on la multiplie par $1/R$ (facteur de conversion).

Cette méthode présente quelques faiblesses, notamment la difficulté de choisir un rendement approprié qui ne paraisse pas trop arbitraire, mais aussi le fait que cette méthode

n'est pas pertinente pour les pays à forte part d'hydroélectricité et enfin qu'elle le sera de moins en moins compte-tenu de la progression dans le mix énergétique des énergies renouvelables telles que l'électricité d'origine éolienne et l'électricité solaire.

Cette méthode continue cependant à être utilisée par l'Energy Information Administration (EIA) américaine avec un coefficient de conversion thermique fondé sur un rendement R autour de 40 % et donc un facteur de conversion $1/R$ de l'ordre de 2,5.

Cependant, ce coefficient de conversion thermique n'est pas utilisé pour la consommation directe de certaines de ces énergies renouvelables comme par exemple pour le solaire thermique employé pour la production d'eau chaude sanitaire ou la géothermie pour la production d'électricité.

¹⁴²Voir Chapitre 1

La méthode du contenu énergétique physique

Pour tenir compte de l'importance grandissante des énergies renouvelables, l'AIE, comme la plupart des organisations européennes, a adopté la méthode du contenu énergétique physique.

Cette méthode, plus proche de la réalité physique, considère que l'électricité d'origine renouvelable est une énergie primaire. En effet l'électricité est directement produite par les éléments naturels que sont le vent, le soleil ou la chute d'eau. Ceci revient à utiliser un coefficient de conversion de 1 (ou 100%). Dans le

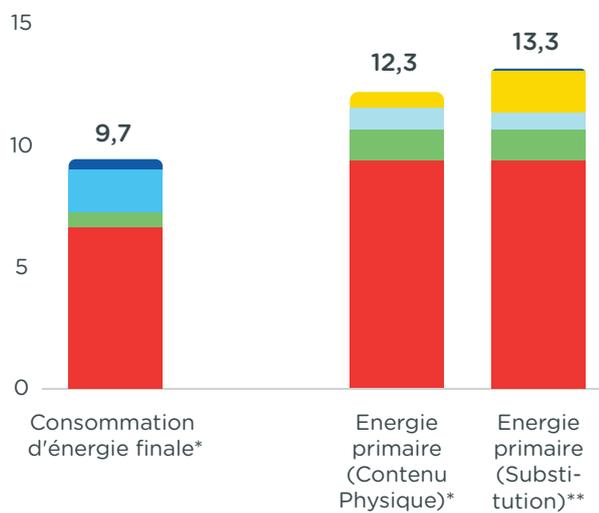
cas de la production d'électricité nucléaire, qui passe par l'énergie calorifique, l'AIE conserve un coefficient de conversion de 3 qui correspond à un rendement de 33%, qui est le rendement moyen des centrales nucléaires en Europe.

Ces deux méthodes sont résumées dans le tableau ci-dessous :

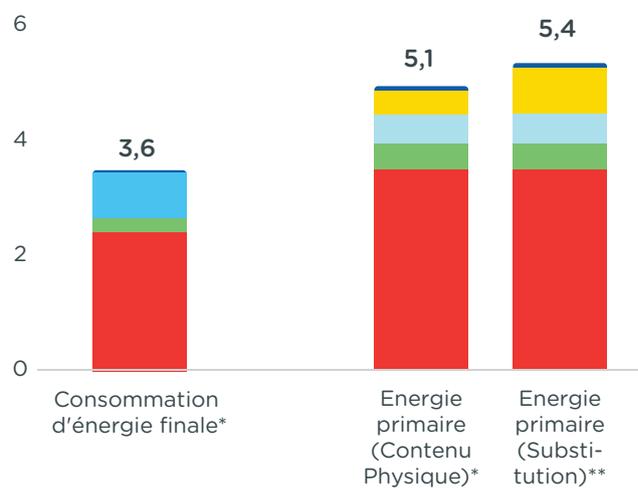
	Contenu énergétique physique	Substitution partielle
Méthode	<p>Electricité ramenée en énergie primaire avec un facteur de conversion différent selon que les électrons sont considérés comme une source primaire ou secondaire.</p> <p>Electrons considérés comme énergie primaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - hydraulique : rendement 100% - solaire PV : rendement 100% - éolien : rendement 100% <p>1 TWh de ces électricités renouvelables comptera pour 1 TWh d'énergie primaire ou 86 kTep</p> <p>Electrons considérés comme énergie secondaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nucléaire : rendement 33% - Solaire concentré pour électricité : rendement 33% - Géothermie pour électricité : rendement 10% - CCGT cycle combiné gaz : rendement 60% <p>1 TWh d'électricité nucléaire ou solaire concentré comptera pour 3 TWh d'énergie primaire ou 258 kTep</p>	<p>Electricité convertie en énergie fossile qui serait requise pour produire une quantité équivalente d'électricité, quelle qu'elle soit.</p> <p>On utilise le rendement moyen d'une production par une centrale thermique, souvent autour de 40% (et qui évolue dans le temps).</p> <p>1 TWh d'électricité correspond à 2,5 TWh d'énergie primaire ou 215 kTep.</p>
Exemples d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - AIE, OCDE - Nombreuses organisations utilisant les données de l'AIE 	<p>Macro :</p> <ul style="list-style-type: none"> - US EIA (rendement = 38% Eolien, Solaire, Hydro, Géothermie, 33% Nucléaire) - BP (BP Statistical Review et International Comparisons) : rendement = 40% (2019) → 45% (2020-2050)

Figure 4.6 : Les méthodes de conversion des énergies
 Source : AIE, BP Statistical Review of the World Energy, EIA

Conversion Energie Finale vers Primaire - Allemagne (EJ)



Conversion Energie Finale vers Primaire - Espagne (EJ)



● Energie fossile ● Biomasse ● Electricité ● Nucléaire ● Renouvelables ● Chaleur

*Données AIE

**Renouvelables converties avec un facteur de 40%

Figure 4.7 : Exemples de conversion en énergie primaire pour l'Allemagne et l'Espagne

Source : Données AIE pour la consommation finale et l'énergie primaire (contenu physique).

A noter : le volume d'énergie primaire par substitution a été reconstitué avec des facteurs de conversion de 40% pour les énergies renouvelables et le nucléaire.

4.4

Synthèse

Les différentes formes d'énergie, que ce soient les énergies primaires (fossiles, nucléaire, hydraulique, biomasse, solaire, éolien) ou les énergies secondaire (électricité, hydrogène, e-fuels, ...) ont toutes des caractéristiques et des usages différents qu'il convient de bien appréhender afin de pouvoir les comparer entre elles de manière juste et pertinente.



Réussir la décarbonation du système énergétique passe également par la prise en compte des besoins de flexibilité et par l'assemblage de solutions (production, stockage, maîtrise de la demande) pour répondre au mieux aux différents besoins énergétiques. Dans le futur la flexibilité pourra être renforcée par les liens avec les réseaux de gaz et de chaleur, par exemple en utilisant le surplus d'électricité pour produire de

l'hydrogène qui sera ensuite injecté dans le réseau de gaz (on parle de *Power-to-Gas* ou *Power-to-X*). Cependant plus les étapes de transformation sont nombreuses, plus il y a de pertes et plus le coût final augmente.

Le tableau ci-dessous synthétise l'ensemble des caractéristiques à prendre en compte pour comparer les énergies entre elles.

	Pétrole	Gaz	Charbon	Biomasse	Uranium / Nucléaire	Hydraulique (barrages)	Solaire PV	Solaire thermique	Éolien terrestre	Éolien maritime	Hydrogène (vecteur)	Electricité (vecteur)
Densité énergétique (MJ / kg)	Très forte (41-48 MJ/kg)	Forte (38-50 MJ/kg)	Forte (24 MJ/kg)	Moyenne (12-19 MJ/kg)	Extrêmement forte (600 000 MJ/kg d'uranium)	Forte (rendement: 70 à 80%)	Très faible env. 1,4 MJ/m ² /j à Bordeaux) : rendement : 12 à 18%	Très faible (env. 4 MJ/m ² /j à Bordeaux) : rendement : 35 à 40%	Faible (env. 72 MJ m ² /j moy. monde) : rendement : 23 à 25%	Faible (env. 115 MJ/m ² j moy. monde) rendement : 38%	Très forte (si comprimé à 700 bars)	N/A
Abondance	60 ans de consom. (y.c pétroles de schistes)	80 ans de consom. (y.c gaz de schiste)	135 ans de consom. (réserves)	Important (10-25% de la consom. actuelle d'énergie)	135-160 ans de consom.	Limitation par la géographie	Infinie (limitation par surfaces disponibles)	Infinie (limitation par surfaces disponibles)	Infinie (limitation par surfaces disponibles)	Infinie (moins de limitation que l'éolien terrestre)	Limitation : quantité de gaz ou d'électricité pour sa production	Illimitée
Impacts négatifs / réseaux électriques	Non	Non	Non	Non	Non	Non, au contraire, stockage d'électricité	Oui, nécessité d'énergie programmable et de stockage	Oui, nécessité d'énergie programmable et de stockage	Oui, nécessité d'énergie programmable et de stockage	Oui, nécessité d'énergie programmable et de stockage	Non	N/A
Impacts négatifs / environnement	Émission de CO ₂ et CH ₄	Émission de CO ₂ et CH ₄	Émission de CO ₂ , CH ₄ , SO _x et NO _x	Émission de particules fines, CO ₂ , SO _x , NO _x , CO	Déchets radioactifs	Modification de l'hydraulicité locale	Faible	Faible	Faible	Faible	H ₂ gris : CO ₂ (+++) ; H ₂ bleu : CO ₂ (+) ; H ₂ vert : non	N/A
Mesures correctives	Capture, stockage et utilisation du carbone (CCUS)	Capture, stockage et utilisation du carbone (CCUS)	Capture, stockage et utilisation du carbone ; Centrales à lit fluidifié	Centrales à lit fluidifié	Vitrification déchets, Stockage profond réversible	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Renforcement de l'efficacité énergétique

Figure 4.8 : Synthèse des caractéristiques des énergies
Source : Analyse Capgemini

Les schémas ci-dessous illustrent les ordres de grandeur des puissances installées, des surfaces au sol et du nombre d'installations pour produire 22 TWh d'énergie finale sous forme électrique ou hydrogène.

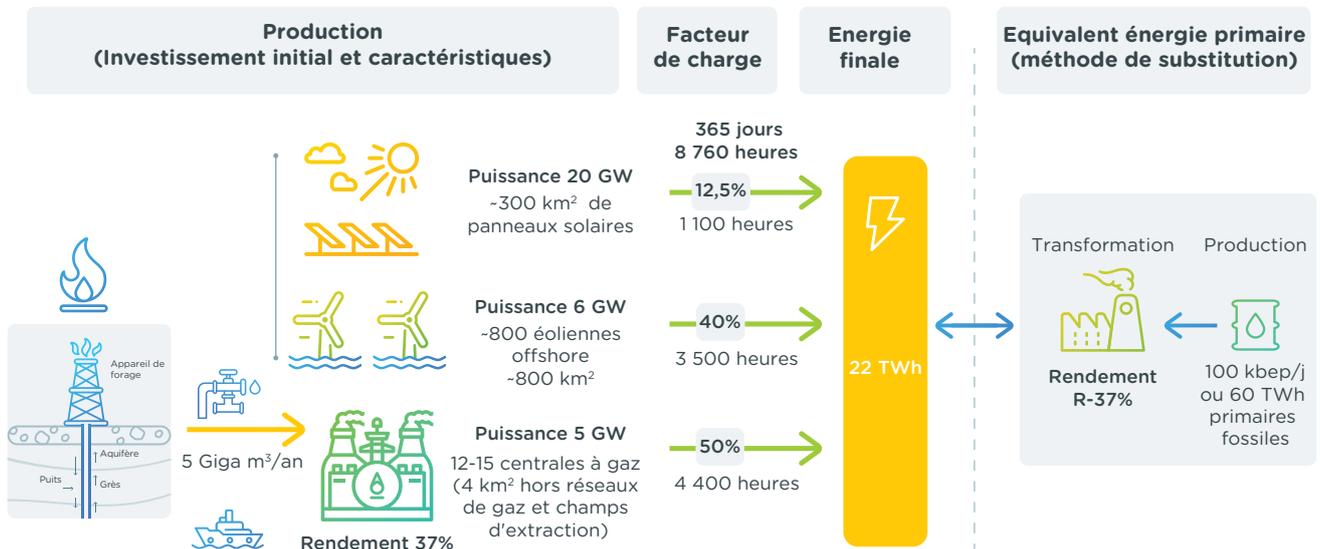


Figure 4.9 : Génération électrique comparée de 22 TWh : solaire photovoltaïque, éolien offshore et gaz
Source : Analyse Capgemini

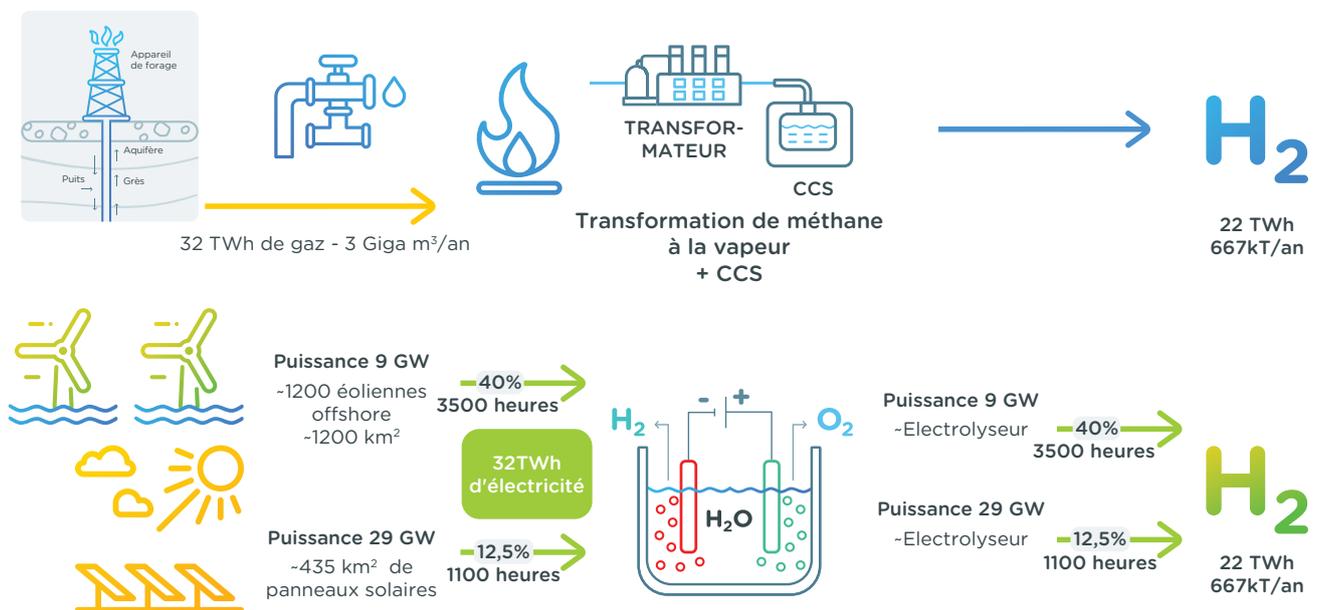


Figure 4.10 : Comparaison de production d'hydrogène : hydrogène bleu vs. hydrogène vert
Source : Analyse Capgemini





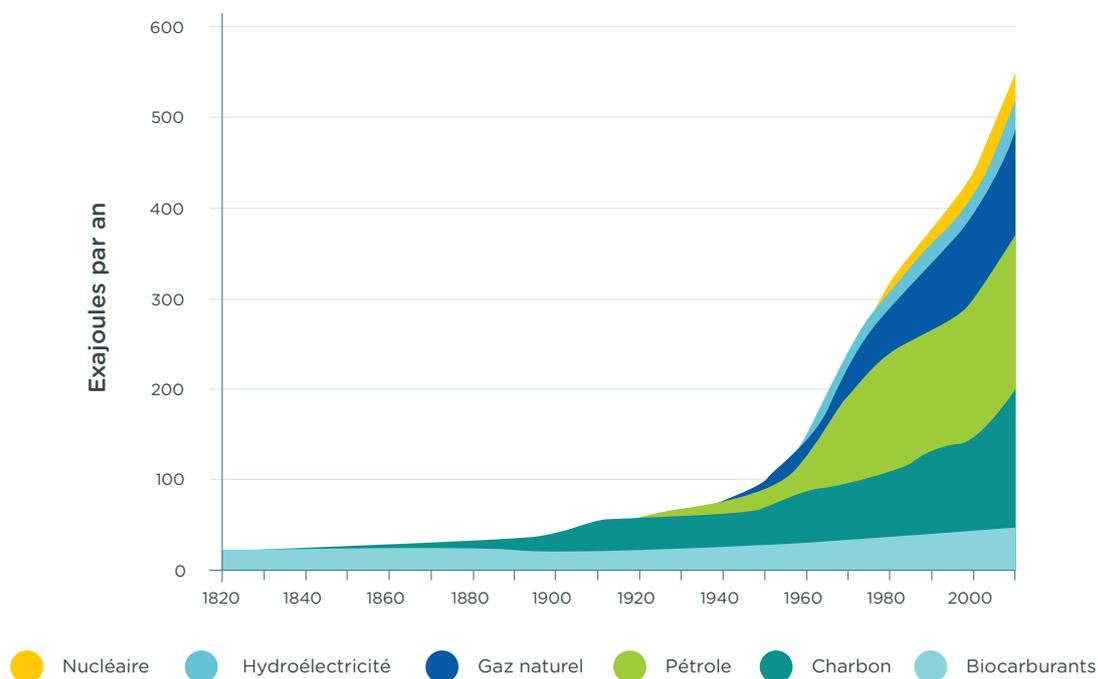
5

Comment assurer
l'approvisionnement
énergétique tout
en décarbonant
l'économie ?

5.1

Les leviers d'action :
éviter, réduire,
compenser

Consommation énergétique mondiale



Consommation énergétique mondiale par source, basée sur les estimations de Vaclav Smil dans "Energy Transitions: History, Requirements and Prospects" en partenariat avec BP

Figure 5.1 : La consommation d'énergie mondiale depuis 1820 en EJ

Source : Vaclav Smil & BP Statistical 2020

L'énergie est un bien fondamental à la vie humaine sur Terre et au bien-être des populations.

Depuis la révolution industrielle, on assiste à une très forte croissance de la demande en énergie liée à l'accroissement de la population et au développement de son niveau de vie.

Cette forte croissance de la demande ayant été principalement alimentée par l'utilisation de combustibles fossiles, a mécaniquement fait augmenter fortement les émissions de GES.¹⁴³

Au sommet de la Terre organisé par les Nations Unies à Rio de Janeiro en 1992¹⁴⁴, les 189 pays présents ont adopté un texte fondateur de 27 principes, intitulé « Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement », qui précise la notion de développement durable et qui énonce que, pour y parvenir, « la protection de l'environnement doit faire partie intégrante du processus de développement et ne peut être considérée isolément » (Principe 4). On peut d'ailleurs noter que parmi les 17 Objectifs de Développement Durable des Nations Unies¹⁴⁵ figurent l'énergie propre à un coût abordable

(objectif 7) ainsi que la lutte contre les changements climatiques (objectif 13).

En 2015, la Conférence des Parties à la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP 21)¹⁴⁶, qui s'est tenue à Paris, a adopté l'Accord de Paris par lequel les Etats Parties se fixent pour objectifs de maintenir l'augmentation de la température de notre planète à moins de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels, de poursuivre l'action menée pour la limiter à 1,5°C¹⁴⁷, et de parvenir à la neutralité carbone au cours de la

¹⁴³Sauf en 2020, année marquée par la pandémie de Covid-19, au cours de laquelle la consommation en énergie a décliné de 5% et les émissions de GES de 7%

¹⁴⁴<https://www.un.org/fr/conferences/environment/rio1992>

¹⁴⁵<https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

¹⁴⁶<https://unfccc.int/fr/process-and-meetings/l-accord-de-paris/qu-est-ce-que-l-accord-de-paris>

¹⁴⁷Accord de Paris, Article 2, 1, a)

deuxième moitié du XXI^e siècle.¹⁴⁸ Cela suppose une limitation des émissions de GES et leur compensation à l'échelle de la planète.

Malheureusement, depuis 2015, (à l'exception de l'année 2020), la consommation mondiale d'énergie et les émissions de GES ont continué d'augmenter, notamment sous l'impulsion des pays en développement.¹⁴⁹

Selon un rapport spécial du GIEC¹⁵⁰ publié en 2018 et relatif au scénario « 1,5° », le niveau d'ambition internationale (résultant à cette date des Contributions Déterminées au niveau national) est insuffisant pour limiter le réchauffement à 1,5°C. Le prochain rapport d'évaluation du GIEC prévu en 2022 est fortement attendu pour confirmer ou non cette tendance.

Toujours selon ce rapport du GIEC, **sans ambition de limitation accrue et urgente** dans les années à venir, conduisant à une forte baisse des émissions de GES d'ici 2030, le réchauffement climatique dépassera 1,5°C dans les décennies à venir, conduisant à une perte irréversible des écosystèmes les plus fragiles et à des événements climatiques à répétition très dommageables pour les personnes et les sociétés les plus vulnérables.

Nous l'avons décrit précédemment, énergie et climat sont liés, énergie et développement également. Parmi les 17 Objectifs de Développement Durable des Nations Unies¹⁵¹ figurent l'énergie propre et d'un coût abordable ainsi que la lutte contre les changements climatiques.



La question qui se pose est donc : **comment assurer l'approvisionnement en énergie de la planète sans en augmenter la température et par ailleurs, sans en épuiser les ressources ?**

Pour répondre à ce double défi, de nombreux moyens et pistes sont envisagés. Ils consistent à :

- **Eviter** les usages inutiles et recourir à des technologies non émettrices de GES.
- **Réduire** les émissions et les pertes d'énergie en augmentant l'efficacité des techniques et des procédés.
- **Compenser** en facilitant le retrait de carbone du cycle le conduisant à l'atmosphère. Ce levier, consistant à le séquestrer dans des puits de carbone par des moyens naturels ou techniques, doit être actionné sur la partie restante des émissions, une fois que tous les efforts maximaux ont été faits pour Eviter et Réduire.

LA NEUTRALITÉ CARBONE

Selon l'Accord de Paris, il est nécessaire pour contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C, d'atteindre la neutralité carbone dans la seconde moitié du XXI^e siècle. La neutralité carbone correspond à l'équilibre entre les émissions de GES et les absorptions par les puits de carbone. On parle aussi de « zéro émissions nettes ». De plus en plus d'États - de même que l'Union européenne - de métropoles et d'entreprises ont choisi de viser la neutralité carbone dès 2050.

¹⁴⁸Accord de Paris, Article 4, 1.

¹⁴⁹Voir Chapitre 2 concernant la demande d'énergie

¹⁵⁰IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

¹⁵¹<https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

¹⁵²Métaux rares comme le nickel ou terres rares

RÉINVENTER ET ACCÉLERER LE DÉVELOPPEMENT D'UN MIX ÉNÉRGETIQUE DIVERSIFIÉ ET DÉCARBONÉ

Les énergies fossiles émettrices de CO₂ représentent encore plus de 80% de la consommation mondiale d'énergie. **Pour tendre vers la neutralité carbone, il faut :**

1. Accélérer la substitution des énergies fossiles par des énergies décarbonées. Cette accélération est importante car la pénétration de nouvelles technologies est lente. Les actions possibles incluent :
 - Une électrification plus poussée (véhicules électriques, processus industriels, chauffage) grâce aux moyens de production d'électricité bas-carbone.
 - L'incorporation de liquides ou gaz durables (bioénergies, hydrogène) dans le pétrole et le gaz afin de réduire leur empreinte carbone.
 - Le recours à des carburants ou gaz de synthèse.
2. Pour les émissions résiduelles, capter et neutraliser : généraliser dans les installations industrielles et les centrales électriques, la Capture et le Stockage du CO₂ (CCS). Les coûts des technologies actuelles restent encore trop élevés par rapport au coût du carbone (par exemple le coût sur les marchés ETS, voir plus loin), il est important d'accélérer la recherche, le développement et le déploiement des technologies CCS et également de développer les

projets de préservation des écosystèmes naturels (« *nature based solutions* »). En parallèle, il faut augmenter le coût du carbone (voir plus loin).

INVESTIR DANS L'EFFICACITÉ ÉNÉRGETIQUE

Des politiques d'incitation et d'éducation peuvent permettre d'améliorer continuellement **l'efficacité énergétique** notamment dans les pays en développement pour produire les mêmes biens et services tout en consommant moins d'énergie. Par exemple, les ampoules LED produisent la même quantité de lumière que les ampoules à incandescence en utilisant 75 à 80% moins d'électricité.

Cependant le rythme de réduction de **l'intensité énergétique** mondiale observé ces dernières années (1,6% en 2019 et 1,5% en 2018)¹⁵³ est bien en dessous du niveau nécessaire pour atteindre les objectifs mondiaux en matière de climat. Le rapport NZE de l'AIE¹⁵⁴ fait l'hypothèse d'une accélération de cette réduction avec une efficacité énergétique de 4% par an entre 2020 et 2030, ce qui est très ambitieux comparé à la moyenne observée de 1,6% entre 2010 et 2020.

Dans certains pays, comme la France, l'obligation pour les fournisseurs d'énergie, d'une certaine taille, d'acquérir des CEE¹⁵⁵ (Certificats d'Economie d'Energie) en incitant leurs clients à faire des économies d'énergie est un dispositif coûteux pour ces entreprises mais efficace.

ADAPTER LES ÉNERGIES AUX USAGES

Dans le passé les énergies se sont adaptées aux **usages** : en effet compte tenu des progrès technologiques et de l'évolution des usages, le type d'énergie adapté à chaque usage a évolué. Par exemple l'électricité est utilisée de façon dominante pour l'éclairage et pour les moteurs stationnaires alors que le gaz de charbon était utilisé tout au long du XIX^e siècle pour l'éclairage de rue dans les pays occidentaux¹⁵⁶.

La réponse au défi climatique passe également par une adaptation des énergies aux usages, en favorisant cette fois-ci les solutions décarbonées. Pour chaque usage il faut choisir la forme d'énergie décarbonée la plus adaptée, aisément disponible et qui a demandé le moins de transformation, de sorte à limiter les pertes et le coût.

L'électricité est le meilleur vecteur énergétique pour un grand nombre d'usages parce qu'elle ne demande qu'une seule transformation et qu'elle se transporte facilement. Elle sert de nombreux usages, à la différence des réseaux de chaleur, plus performants mais pour le seul usage chaleur. L'hydrogène qui requiert deux transformations, et plus encore les carburants de synthèse qui requièrent trois transformations, devraient être dirigés vers les usages que l'on ne sait pas décarboner autrement.

¹⁵³Source: IEA (International Energy Agency) (2020) Energy Efficiency 2020. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020>. All rights reserved.

¹⁵⁴Source: IEA (International Energy Agency) (2020) Net Zero by 2050 - A roadmap for the global Energy Sector, May 2021. All rights reserved. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

¹⁵⁵<https://www.ademe.fr/expertises/changement-climatique/passer-a-l'action/comment-valoriser-economies-denergie-cee/principes-fonctionnement-dispositif-cee>

¹⁵⁶http://sii-technologie.ac-rouen.fr/Microtechniques/STI2D/Projet_Lumea/Pour_aller_plus_Join/Histoire_de_L_eclairage_en_France.pdf

ACCÉLÉRER LE PROGRÈS TECHNOLOGIQUE

Par des politiques ambitieuses de recherche et développement, **l'accélération du progrès technologique joue un rôle essentiel.**

Les technologies propres à chaque secteur

- A court terme : par exemple par l'utilisation de semi-conducteurs à plus haut rendement de conversion photon-électron pour continuer à faire baisser les coûts du solaire photovoltaïque ou encore l'utilisation des nanotubes de carbone pour améliorer la performance des batteries.¹⁵⁷
- A moyen terme : par exemple la technologie des électrolyseurs à haute température, développée par le CEA¹⁵⁸ promet de hauts rendements de fabrication d'hydrogène électrolytique.
- A long terme : les recherches sur la fusion nucléaire avec notamment le projet international ITER¹⁵⁹, pourraient aboutir à la production industrielle d'électricité décarbonée quatre fois supérieure à celle de la fission nucléaire et utilisant des combustibles largement disponibles et quasiment inépuisables.

L'utilisation du numérique avec la généralisation de capteurs connectés, de l'analyse des données et des l'intelligence artificielle

- Par exemple pour mieux connaître localement les vents et mieux les utiliser pour produire de l'électricité.

- Du côté des usages, les capteurs domestiques commandés à distance par téléphone portable permettent de réduire la consommation énergétique des logements tout en gardant le même confort.

RENFORCER ET CRÉER DES Puits DE CARBONE POUR ATTEINDRE L'OBJECTIF NET ZERO (OU DE NEUTRALITÉ CARBONE)¹⁶⁰ :

Atteindre la trajectoire de neutralité carbone d'ici la deuxième moitié du siècle, implique de mener des actions drastiques de réductions des émissions liées aux activités humaines de 40 à 70% pour limiter le réchauffement à 1,5°C, d'ici 2050¹⁶¹ grâce aux leviers décrits dans ce chapitre. Cela nécessitera aussi d'éliminer les émissions de GES résiduelles en les retirant de l'atmosphère et en les séquestrant.

Pour cela, les actions peuvent être :

- L'augmentation des puits de carbone naturels (*Nature Based Carbon Removals* en anglais).
- La mise en œuvre des puits de carbone selon des procédés artificiels pour éliminer le CO₂ en grande quantités. Ces actions sont regroupées sous la dénomination Capture et Stockage de Carbone (CSC ou CCS, *Carbon Capture and Storage* en anglais).

La capture du CO₂ consiste à piéger les molécules de gaz carbonique avant, pendant ou après l'étape de combustion afin d'éviter leur libération dans l'atmosphère. Ce

procédé fait diminuer le rendement des installations et a donc un coût significatif.

Cette capture peut être mise en œuvre dans les industries fortement émettrices de CO₂ : les centrales électriques qui fonctionnent au charbon, au fioul voire au gaz, les usines sidérurgiques ou pétrochimiques, les cimenteries, les raffineries de pétrole, etc.

Après la phase de capture, le gaz carbonique doit être transporté jusqu'à un site de stockage permanent puis injecté dans le sous-sol, par exemple à travers d'anciens puits pétroliers en mer dans d'anciens gisements d'hydrocarbures. Les caractéristiques des stockages choisis doivent permettre de piéger le CO₂ pendant des milliers d'années. Ces installations devront être surveillées en permanence.

Le CO₂ capturé peut aussi être réutilisé (CCU *Carbon Capture & Usage*), par exemple combiné à de l'hydrogène vert pour produire des carburants et des gaz synthétiques.

Des efforts importants de recherche et de développement, et de construction d'installations prototypes, sont déployés depuis de nombreuses années¹⁶². Il s'agit notamment d'abaisser le coût de procédé de CCS qui reste actuellement proche de 100 €/tCO₂¹⁶³. D'après l'UNECE, rien qu'en Europe, environ 320 milliards € seront nécessaires pour le déploiement de solutions CCS et 50 milliards supplémentaires pour financer les infrastructures de transport.¹⁶⁴

¹⁵⁷<http://www.nawatechnologies.com/nawa-technologies-revolutionne-stockage-de-lenergie-nouvelles-batteries/>

¹⁵⁸<https://www.industrie-techno.com/article/la-technologie-d-electrolyse-du-cea-qu-exploitera-genvia-pour-produire-de-l-hydrogene-atteint-99-de-rendement-se-rejouit-julie-mougouin-du-cea-liten.63839>

¹⁵⁹<https://www.iter.org/fr/accueil>

¹⁶⁰<https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20190926STO62270/qu-est-ce-que-la-neutralite-carbone-et-comment-l-atteindre-d-ici-2050>

Capture, stockage et valorisation du carbone (CCUS)

Le CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) est essentiel pour libérer tout le potentiel de la décarbonisation et atteindre la neutralité carbone.

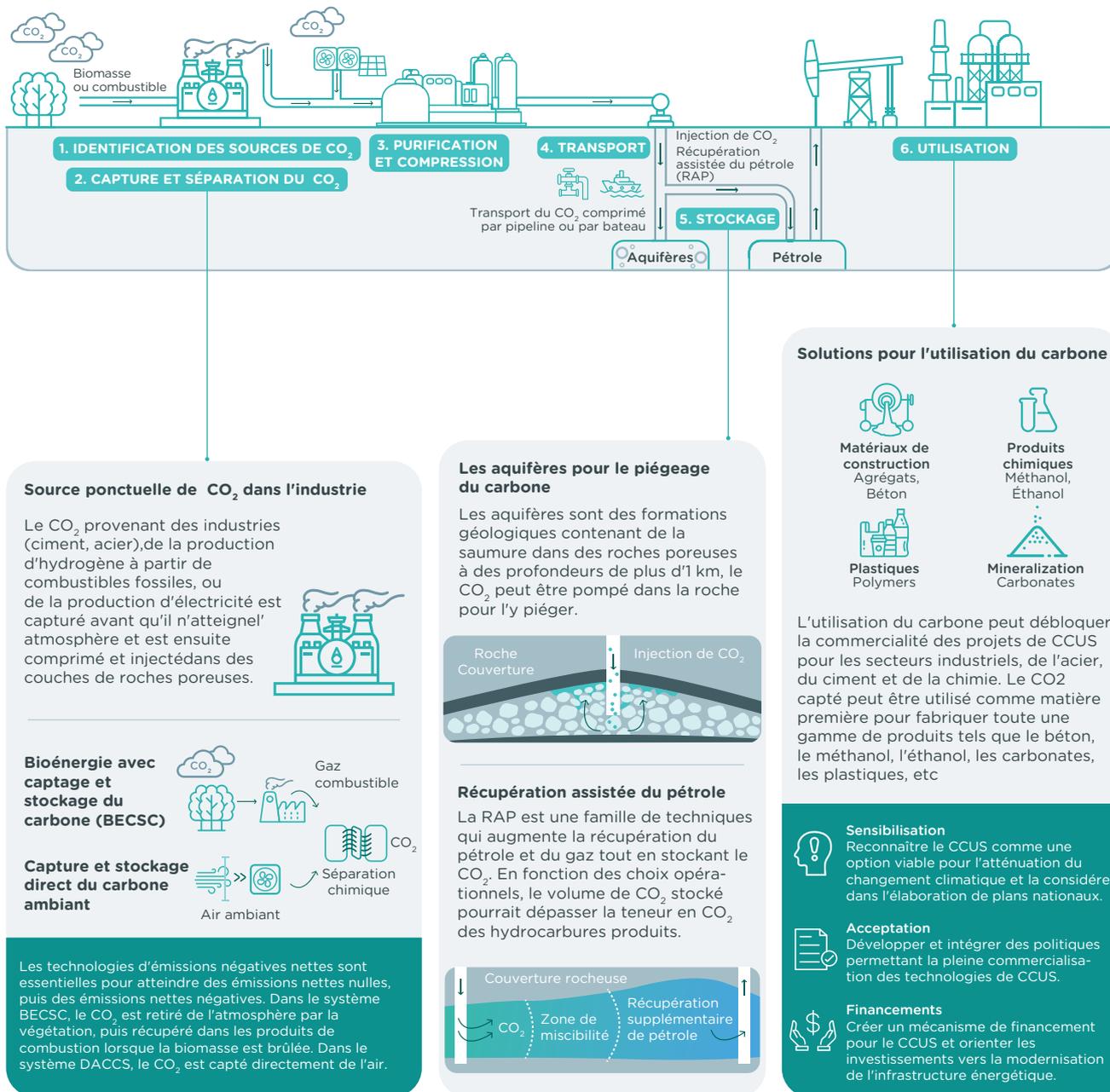


Figure 5.2 : La Capture du Carbone, son Utilisation et son Stockage

Source : UNECE

¹⁶¹GIEC, 2018 : Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield], Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 32 p.

¹⁶²<https://www.total.com/fr/groupe/engagement/changement-climatique/neutralite-carbone>

¹⁶³C'est le cas du projet « Northern Lights » en Norvège. Bien sûr, le modèle économique de telles installations s'améliore dès lors que l'on instaure un coût du carbone élevé.

¹⁶⁴<https://news.un.org/en/story/2021/03/1086312>

MESURER

La mesure est indispensable pour comparer les énergies et suivre les progrès.

- Dans le chapitre 4, nous avons décrit des méthodes de comparaison des différents types d'énergie. Même si ces méthodes gomment les caractéristiques différentes de ces énergies, elles sont importantes notamment pour comparer des portefeuilles d'énergies (d'énergéticiens ou de pays), les suivre et les gérer.
- Le chapitre 3 a également permis d'introduire la notion d'équivalent CO₂ permettant d'agréger l'effet sur le climat des différents GES.
- Beaucoup d'entreprises industrielles ont établi des objectifs de neutralité carbone¹⁶⁵ à l'horizon 2050.

Il existe plusieurs méthodes de « mesure » des émissions associées aux portefeuilles d'activités des entreprises¹⁶⁶ mais pour l'instant elles conduisent à des résultats différents. Une standardisation (comme c'est le cas pour les agrégats financiers) serait nécessaire pour disposer d'un reporting régulier et comparable.

A titre d'exemple l'initiative *Science Based Targets*¹⁶⁷ préconise une méthode d'évaluation des objectifs de neutralité carbone d'entreprise visant à vérifier s'ils sont cohérents avec l'objectif global de température de l'Accord de Paris. Elle propose ainsi, pour un certain nombre de secteurs, une base pour l'évaluation des stratégies d'entreprises en matière de changement climatique.



En avril 2020, plus de 350 entreprises ont établi leurs objectifs selon cette méthode SBT et plus de 500 se sont engagées à le faire dans un proche avenir¹⁶⁸. Dans le domaine de l'énergie, il existe une méthodologie SBTi pour l'électricité mais pas encore pour le secteur pétrolier et gazier.

ACCOMPAGNER PAR DES POLITIQUES PUBLIQUES

La mobilisation des politiques publiques éclairées par les analyses ou recommandations scientifiques et adoptant des plans accompagnés de moyens pour les réaliser est indispensable pour atteindre la neutralité carbone. **Voici quelques exemples :**

Les lois

Un règlement de l'Union européenne adopté en juillet 2021 fixe l'objectif juridiquement contraignant d'atteindre la neutralité climatique de

l'UE d'ici à 2050, avec un objectif intermédiaire en 2030 de - 55 % d'émissions nettes (c'est-à-dire déduction faite des absorptions par les puits de carbone) par rapport à 1990.

De nombreux pays, notamment en Europe, ont adopté des lois de transition énergétique.

Dans sa loi « énergie-climat » de 2019, la France s'est fixée pour objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 en divisant les émissions de GES par un facteur supérieur à six entre 1990 et 2050.

Mentionnons aussi la loi de transition énergétique allemande qui préconise la sortie progressive de la production d'électricité à partir du charbon au plus tard d'ici 2038 alors que ces énergies fossiles ont contribué en 2019 à 28% de la production d'électricité du pays.

¹⁶⁵La neutralité carbone à l'intérieur d'un périmètre donné, est un état d'équilibre à atteindre entre les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine et leur retrait de l'atmosphère par l'homme ou de son fait. La différence entre les gaz émis et extraits étant alors égale à zéro, la neutralité carbone est également désignée par l'expression zéro émissions nettes (ZEN).

¹⁶⁶The alignment cookbook: A Technical Review of Methodologies Assessing a Portfolio's Alignment with Low-Carbon Trajectories or Temperature Goal

¹⁶⁷<https://sciencebasedtargets.org/resources/legacy/2017/04/SBTi-manual.pdf>

¹⁶⁸<https://sciencebasedtargets.org/>



La réglementation dans les bâtiments

De très nombreuses réglementations existent dans le secteur des bâtiments qui représente 40% des émissions globales de GES d'après la *Global Alliance for Buildings and Construction*¹⁶⁹.

Environ 35% des bâtiments de l'UE ont plus de 50 ans et près de 75% du parc immobilier est inefficace sur le plan énergétique. Dans le même temps, seuls 0,4 à 1,2% (selon les pays) du parc immobilier est rénové chaque année. La rénovation des bâtiments existants peut conduire à des économies d'énergie significatives et jouer un rôle clé dans la transition énergétique, car elle pourrait réduire la consommation totale d'énergie de l'UE de 5 à 6% et les émissions de CO₂ d'environ 5%.¹⁷⁰

Rénover les bâtiments existants est un véritable défi. Par exemple le Royaume-Uni envisage la rénovation énergétique de 27 millions de logements d'ici 2050. Ceci nécessiterait des investissements de l'ordre de 1000 milliards de livres

sterling (environ 1200 milliards d'euros) ainsi qu'une mobilisation considérable notamment en ce qui concerne la main d'œuvre. Ainsi pour atteindre cet objectif dans les 30 ans à venir, il faudrait rénover une ville de la taille de Cambridge toutes les six semaines.¹⁷¹

La réglementation dans les transports

Les transports représentent environ 17% des émissions globales de GES (figure 3.5). De très nombreuses réglementations existent notamment sur la consommation et les émissions des véhicules à essence ou diesel. En Europe, ces réglementations ont été considérablement renforcées lorsque les pays de l'Union européenne ont convenu en 2014¹⁷² que les constructeurs automobiles devraient limiter les émissions de CO₂ à 95 grammes par kilomètre sur l'ensemble de leur gamme de modèles d'ici 2020. La réglementation des émissions polluantes est appelée à se durcir dans le cadre de la stratégie

européenne de mobilité durable et intelligente publiée en décembre 2020¹⁷³.

Selon l'Agence européenne de l'environnement le chiffre pour 2018 était d'environ 120 grammes par kilomètre en moyenne.

Si l'objectif n'est pas atteint, les groupes automobiles devront payer des amendes de 95 € par gramme au-delà de la limite, multiplié par le nombre de voitures qu'ils vendent. En 2020, le montant total des amendes devrait s'élever à au moins 500 millions d'euros.¹⁷⁴ Cette réglementation a poussé les constructeurs automobiles européens à mettre sur le marché plus de modèles de voitures électriques.

Notons aussi l'émergence de zones à faibles émissions (ZFE), comme à Paris avec des restrictions plus strictes et limitant la circulation à partir de 2024 aux véhicules les moins émissifs puis uniquement aux véhicules propres (électrique / hydrogène) à partir de 2030.

¹⁶⁹https://architecture2030.org/buildings_problem_why/

¹⁷⁰[www.capgemini.com WEMO 2020 17](http://www.capgemini.com/WEMO/2020/17)

¹⁷¹[www.capgemini.com WEMO 2019](http://www.capgemini.com/WEMO/2019) : Editorial Europe

¹⁷²<https://www.industryweek.com/the-economy/environment/article/22024227/carmakers-face-billions-in-european-co2-fines-from-2021#:~:text=lf%20the%20>

¹⁷³https://ec.europa.eu/france/news/20201209/plan_mobilite_verte_durable_abordable_fr

¹⁷⁴<https://www.automobile-magazine.fr/toute-l-actualite/article/28823-objectifs-co2-des-amendes-a-payer-pour-volkswagen-ford-fiat-mercedes-et-volvo>

Les marchés du carbone

Dès 2005, l'Europe a créé un Système d'Echange de Quotas d'Emission de CO₂, le SEQE, plus connu sous son nom anglais EU ETS (*Emissions Trading System*)¹⁷⁵. Des quotas sont distribués aux industries les plus émettrices de GES, considérées à risque de fuites de carbone. Un quota équivaut à l'émission d'une tonne de CO₂. Les entreprises qui ont des excédents de quotas (car elles ont moins émis que prévu) peuvent les vendre sur ce marché du carbone ; à l'inverse celles qui ont un déficit de quotas peuvent en acheter. Comme sur tout marché, le prix du carbone est déterminé par ces échanges.

Depuis sa création les prix ont beaucoup varié allant jusqu'à quasiment zéro euro la tonne. Les réformes successives et notamment celle mise en place en 2019¹⁷⁶, ont permis de stabiliser ce marché et le prix a dépassé 50€/t en mai 2021. C'est encore un prix faible par rapport à la trajectoire de baisse des émissions de GES nécessaire à l'atteinte de la neutralité carbone (prix de 130 \$/tCO₂ d'ici à 2030 selon le scénario NZE de l'AIE) et par rapport à ce qu'il faudrait pour rentabiliser des systèmes de capture et de stockage de CO₂. D'après une estimation du Global CCS Institute, le coût de capture et stockage de CO₂ oscille entre 80 et 160€/t (entre 93 et 186 €/t).¹⁷⁷

Depuis la sortie de l'Union européenne, le Royaume-Uni a lancé son propre marché du carbone dont le mécanisme est très proche du marché européen. Ainsi les prix ont atteint 43,99£ ou 51€/t en mai 2021 lors de l'inauguration du marché.¹⁷⁸



L'Europe se préoccupe aussi de ce qui est appelé les « fuites de carbone ». En effet les industries européennes qui répercutent sur leurs prix, le coût des quotas qu'elles doivent acheter, perdent en compétitivité. Cela pousse à la délocalisation de la production européenne vers des pays extérieurs à l'Union européenne qui n'ont pas ces contraintes. Cette difficulté a conduit l'Union européenne à vouloir adopter une taxe carbone aux frontières pour taxer le contenu carbone des produits importés. Ces importations représenteraient plus de 20% des émissions de l'Europe. Mais ce projet se heurte aussi à l'opposition d'un certain nombre de pays exportateurs vers l'Europe.

On voit dans cet exemple, la difficulté de mettre en place des règles donnant un signal économique fort pour encourager les projet bas-carbone, s'il n'y a pas de consensus international. Il s'agit néanmoins d'une voie à poursuivre.

Les subventions à l'émergence des énergies vertes

Cela a été longtemps le cas en Europe avec les tarifs de rachat imposés. Ces tarifs étaient plus chers que les prix de marché. Ce système, qui coûte cher aux consommateurs d'électricité, a été efficace pour accélérer la pénétration des énergies renouvelables. Il est en voie d'extinction en Europe notamment. Avec la baisse spectaculaire des coûts des énergies renouvelables, il est d'ailleurs moins nécessaire.

Il existe aussi de nombreuses incitations fiscales, par exemple en France, pour l'installation de panneaux photovoltaïques, d'unités de biométhane et aux Etats-Unis pour de nouvelles installations de production d'électricité renouvelable. A l'heure actuelle, l'hydrogène décarboné bénéficie aussi de dispositifs de subvention.

Les aides publiques

A titre d'exemple, le plan de relance européen de 750 milliards d'euros adopté en juin 2020, à la suite de la

¹⁷⁵https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_fr

¹⁷⁶https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/reform_fr

¹⁷⁷<https://publications.parliament.uk/pa/cm201719/cmselect/cmbeis/1094/109405.htm>

¹⁷⁸FT "UK carbon price trades at £50 as market opens for first time", 19 Mai 2021



pandémie de Covid-19, prévoit que 30% de ces fonds seront dédiés aux enjeux du changement climatique. Les plans de relance de l'Allemagne et de la France alloueront respectivement 9 et 7 milliards d'euros au développement de l'hydrogène vert. Aux Etats-Unis, Joe Biden a annoncé 35 milliards d'euros pour développer les technologies liées aux énergies propres.¹⁷⁹

Les aides aux pays en développement

La transition énergétique vers des énergies décarbonées est plus difficile pour les pays en développement que pour les pays développés car ils doivent faire face à une demande d'énergie en forte croissance liée à la fois à l'accroissement de leur population et à l'augmentation de son niveau de vie.

Pour se passer d'énergies fossiles, notamment de charbon (qui est

parfois une ressource nationale), il leur faudrait investir de façon importante dans de nouvelles installations ce qui peut être rendu difficile compte tenu de budgets limités. De plus ils peuvent ne pas disposer des technologies nécessaires ni de personnels formés.

Pour assurer une **transition juste**, les pays développés devraient mettre à leur disposition leurs technologies bas carbone et des moyens financiers et humains (notamment en formation de personnel).

D'ailleurs, dans le cadre de l'article 9 de l'Accord de Paris, les pays développés se sont engagés à mobiliser conjointement 100 milliards de dollars par an pour répondre aux besoins des pays en développement, afin de les aider dans leur transition énergétique et d'atténuer les conséquences du changement climatique. Ces financements se mettent en place.

Les aides aux plus vulnérables dans les pays développés

Par ailleurs, dans les pays développés, la transition énergétique risque de renchérir l'accès à l'énergie et obliger les particuliers à investir pour remplacer plus rapidement certains équipements qui ne seront plus autorisés (par exemple acheter une voiture électrique alors que leur voiture à essence fonctionne encore). Le bon ajustement de telles mesures et l'accompagnement des consommateurs est crucial, sauf à créer des problèmes d'acceptabilité comme en témoigne la crise des « gilets jaunes » de 2018-2019 en France.

La commission européenne consciente de cette difficulté et dans un souci de « **transition juste** » a prévu dans son très ambitieux plan de décarbonation (« *Fit for 55*¹⁸⁰ ») un « Fonds pour le climat social » de 72 milliards d'euros qui vise à soutenir la

¹⁷⁹<https://www.lemondedelenergie.com/biden-investissement-energie/2021/04/12/>

¹⁸⁰<https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/eu-plan-for-a-green-transition/>

rénovation des bâtiments et s'engage à subventionner les voitures propres pour les familles vulnérables et les petites entreprises.

POUR SUIVRE LA MOBILISATION DES ENTREPRISES

De très nombreuses entreprises se sont fixées des objectifs de réduction de leurs émissions de GES. Parmi les 2000 plus grandes entreprises du monde (« *Forbes Global 2000* »), une grande majorité a ainsi fait des annonces en ce sens. Plus de 20% d'entre elles se sont même données pour ambition d'atteindre le « net zéro émissions » (en fait à atteindre la neutralité carbone nette) au cours des prochaines décennies.¹⁸¹

Dans le cadre de cette mobilisation, les émissions de GES ont été codifiées selon trois périmètres¹⁸² :

- Le « scope 1 » qui correspond aux émissions directes de GES générées par l'activité de l'entreprise.

- Le « scope 2 » qui correspond aux émissions associées à la consommation d'électricité et de chaleur importées ou achetées par l'entreprise.
- Le « scope 3 » qui correspond aux émissions indirectes de GES par exemple celles produites par les clients de l'entreprise lors de leur consommation des produits achetés à l'entreprise.

Les émissions mondiales anthropiques sont la somme des scope 1 de tous les acteurs (y compris chacun d'entre nous).

La neutralité carbone

Pour atteindre la **neutralité carbone**, les entreprises qui se sont fixées cette ambition conçoivent et mettent en œuvre des plans pour :

1. **Eviter** les émissions par exemple par des mesures d'efficacité énergétique ou de réflexion sur la réalité du besoin (déplacements à l'international remplaçables par une vidéoconférence).

2. **Réduire** les émissions en migrant vers des technologies plus performantes ou moins émissives (par exemple l'utilisation d'électricité décarbonée pour leurs véhicules).

3. **Compenser** : Pour la part d'émissions restantes qui ne peuvent être réduites, elles cherchent à :

- Financer des réductions d'émissions équivalentes dans d'autres pays ou secteurs en achetant des « certificats carbone ».
- Financer la capture de CO₂ dans l'atmosphère en achetant des certificats carbone correspondant à des protections ou des extensions de forêts.

On peut aussi citer RE100 qui est une initiative mondiale réunissant les entreprises les plus influentes du monde qui se sont fixées l'objectif d'un approvisionnement en électricité 100% renouvelable. En mars 2021, RE100¹⁸³ comptait 290 membres, ce qui représente un



¹⁸¹<https://eciu.net/analysis/reports/2021/taking-stock-assessment-net-zero-targets>

¹⁸²<https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/categorie/siGras/0>

¹⁸³<https://www.there100.org/>



volume de consommation d'électricité annuelle de plus de 278 TWh/an soit l'équivalent de la consommation de l'Australie.¹⁸⁴

La sécurité d'approvisionnement

Pour que des entreprises puissent assurer la **sécurité d'approvisionnement**, les investissements à réaliser sont considérables (de l'ordre de milliers de milliards d'euro d'ici une dizaine d'années). Les grands énergéticiens, en particulier, auront un rôle significatif à jouer du fait des moyens financiers et humains importants qui seront requis pour investir dans des projets souvent très capitalistiques et complexes.

Les investissements verts

De plus en plus d'entreprises s'engagent dans des **investissements verts** : le solaire photovoltaïque, l'éolien terrestre ou maritime, les batteries de stockage, les stations de recharge pour véhicules électriques ou encore la fabrication d'hydrogène décarboné. Il s'agit notamment des grands énergéticiens comme les producteurs historiquement

concentrés sur le pétrole et le gaz (TotalEnergies, BP, Shell notamment), les électriciens (EDF, Engie, ENEL, Iberdrola) mais aussi aujourd'hui des plus petites entreprises soutenues par des fonds publics ou privés. Certaines se sont reconverties, comme l'entreprise pétrolière danoise Dong, qui se consacre uniquement à l'éolien maritime et qui a d'ailleurs changé de nom pour s'appeler Ørsted.

FAIRE DU SECTEUR FINANCIER UN ACTEUR MAJEUR DE LA LIMITATION DU RISQUE CLIMAT VIA LES EXIGENCES EN TANT QU'INVESTISSEUR OU PRÊTEUR

Depuis 2015, de nombreuses banques se sont fixées pour objectif de ne plus financer des investissements à base de charbon. Les institutions financières font aussi pression sur les directions des entreprises les plus émettrices. Ainsi en 2007, « *Climate Action 100+* » a été

créé. Cette coalition regroupe plus de 500 investisseurs internationaux (47 000 milliards de dollars d'actifs en gestion) pour faire pression (« dialogue actionnarial ») sur les directions des 100 entreprises mondiales les plus émettrices (auxquelles 61 autres entreprises ont été ajoutées en 2018). Les Nations Unies soutiennent par ailleurs la « *Net-Zero Asset Owner Alliance* » regroupant des fonds de pension et d'infrastructure engagés dans la décarbonation de leurs activités.

Les institutions financières publiques et privées instituent des règles de transparence en matière environnementale pour l'accès au financement des entreprises.

Ainsi en 2015, la « *Taskforce on Climate-Related Financial Disclosures*¹⁸⁵ » a été créée par les institutions internationales pour identifier les informations nécessaires aux investisseurs et pour évaluer correctement les risques et opportunités liés au changement climatique. Elle élabore des recommandations concernant la gouvernance, la stratégie, la gestion des risques et les indicateurs clés correspondants.

¹⁸⁴<https://www.there100.org/media/2666/download>

¹⁸⁵Task Force on Climate related Financial Disclosures: <https://www.fsb-tcfd.org/> <https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2020/10/FINAL-2017-TCFD-Report-11052018.pdf>

De manière plus générale, les exigences d'information extra-financières liées à l'enjeu climat et développement durable augmentent fortement pour les entreprises.

Les instruments financiers comme les obligations vertes¹⁸⁶

Les sociétés émettrices d'obligations vertes s'engagent d'une part, sur l'usage précis des fonds récoltés qui doit porter sur des projets ayant un impact favorable sur l'environnement, et d'autre part, sur la publication chaque année, d'un rapport rendant compte aux investisseurs de la vie de ces projets.

La valeur de ces obligations émises en 2021 atteindrait près de 350 milliards de dollars¹⁸⁷, une croissance de près de 57% en un an. La France est le pays émettant le plus d'obligations vertes en Europe avec 25,8 milliards d'euros de titres verts au 1^{er} semestre 2020.

Les agences de crédits export

Certaines agences de crédit export durcissent leurs conditions de garanties pour les projets en les liant à des objectifs climatiques.

Ainsi le gouvernement français a proposé fin 2020 :

- La cessation progressive d'octroi des garanties publiques pour les projets pétroliers et gaziers.

- La mise en place de critères restreignant l'octroi des garanties pour les projets de centrales thermiques.

- Et la mise en place d'un mécanisme de bonus climatique pour les projets durables.

De même, en juillet 2020, dans un mouvement qui marque un changement de sa politique de soutien au charbon, le gouvernement japonais a déclaré qu'il resserrerait les critères de financement soutenus par l'État pour les centrales électriques au charbon à l'étranger.¹⁸⁸

ASSOCIER LES CITOYENS ET FAIRE ÉVOLUER LES COMPORTEMENTS DES INDIVIDUS

Le mode de vie des citoyens occidentaux est appelé à devenir plus économe en énergie et en émissions de GES. Diverses études montrent qu'il n'existe pas un seul facteur qui pousse les individus à adopter des attitudes d'économie d'énergie. De multiples facteurs tels que les considérations financières, les préoccupations environnementales, la compétitivité, la coopération, la conformité et l'altruisme entrent en jeu. Il existe également des barrières qui empêchent ou limitent les changements de comportement (par exemple : le confort, l'esthétique et l'aménagement physique des maisons).

Une opportunité de transformation pourrait naître du changement de mode de travail lié à l'accélération de l'usage du numérique et des communications à distance, et révélé par la pandémie de la Covid-19. En juin 2020, une étude mondiale « energy-post.eu¹⁸⁹ » a révélé que si toutes les personnes capables de travailler à domicile le faisaient un seul jour par semaine, cela permettrait d'économiser par an environ 1% de la consommation mondiale de pétrole pour le transport routier de passagers. Compte tenu de l'augmentation induite de la consommation d'énergie par les ménages, l'impact global sur les émissions mondiales de CO₂ serait une baisse annuelle de 24 millions de tonnes, soit l'équivalent de la majeure partie des émissions annuelles de CO₂ du Grand Londres. Si tous ceux qui peuvent travailler à domicile le faisaient plus fréquemment qu'un jour par semaine, la réduction des émissions serait proportionnellement plus importante.

¹⁸⁶<https://www.latribune.fr/entreprises-finance/banques-finance/qu-est-ce-qu-un-green-bond-760714.html>

¹⁸⁷https://www.lemonde.fr/argent/article/2021/01/08/obligations-vertes-un-impact-ecologique-toujours-difficile-a-verifier_6065568_1657007.html

¹⁸⁸<https://www.reuters.com/article/us-coal-japan-finance/japan-tightens-rules-on-support-for-overseas-coal-fired-plants-idUSKBN24A0CH>

¹⁸⁹<https://energypost.eu/calculating-the-energy-saved-if-home-working-becomes-the-norm-globally/>

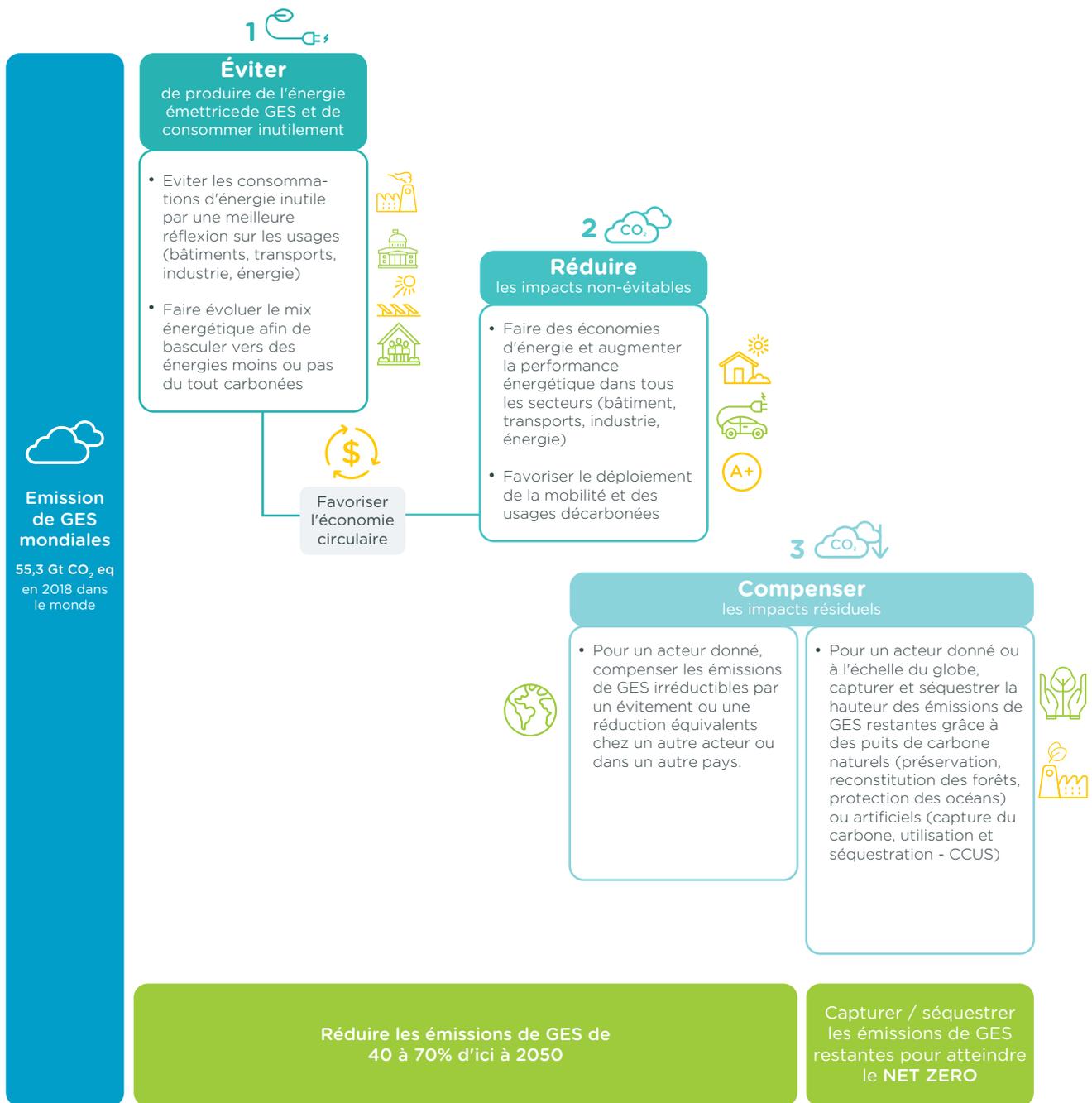


Figure 5.3 : Les leviers d'action pour réduire les émissions et atteindre la neutralité carbone

Source : Analyse Capgemini & UN Environnement – Emissions Gap Reports 2019

A noter : la réduction d'un facteur a minima de 4 à 5 correspond aux différents scénarios du GIEC pour atteindre la neutralité carbone dans le résumé à l'intention des décideurs publié en 2019 pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C

5.2

Conclusion

Cet ouvrage s'est employé à faire comprendre les enjeux à court et long terme liés à la production et la consommation d'énergie ainsi qu'aux émissions de GES.

Le défi d'assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique nécessaire au bien-être des populations tout en préservant notre planète est considérable.

Il apparaît :

- qu'un approvisionnement en énergies disponibles, fiables et propres, à des prix abordables est essentiel au bien-être des populations,
- qu'il n'y a pas d'énergie idéale et qu'il faut donc raisonner en mix énergétique et en mix électrique,
- que les progrès scientifiques et techniques ainsi que les changements sociétaux font évoluer les usages ainsi que les énergies les mieux adaptées pour y répondre,
- que la préoccupation climatique est de plus en plus présente chez les consommateurs,
- que l'amélioration de l'efficacité énergétique, essentiellement dans les pays en développement mais aussi dans les pays développés, constitue un défi qu'il faut relever,
- que les émissions de GES continuent de croître¹⁹⁰ de manière incompatible avec les objectifs de l'Accord de Paris et qu'il y a urgence à déployer tous les moyens pour les faire diminuer afin de se placer sur une trajectoire limitant au maximum la température de la planète,
- que nous avons tous un rôle à jouer : états, collectivités locales, villes, entreprises, citoyens.

Nous espérons que cet ouvrage a donné à ses lecteurs des clés de lecture utiles sur toutes ces questions.

¹⁹⁰Sauf en 2020 pour des raisons liées à la pandémie



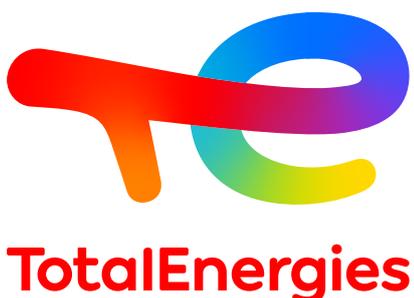
AVERTISSEMENT :

Ce document est publié à des fins d'information. Les auteurs ont cherché à rendre compte de manière synthétique des principaux enjeux de l'énergie, sans toutefois pouvoir prétendre à l'exhaustivité des sources existantes en matière d'énergie et de données scientifiques sur le changement climatique.

À propos de TotalEnergies

TotalEnergies est une compagnie multi-énergies mondiale de production et de fourniture d'énergies : pétrole et biocarburants, gaz naturel et gaz verts, renouvelables et électricité.

Ses 105 000 collaborateurs s'engagent pour une énergie toujours plus abordable, propre, fiable et accessible au plus grand nombre. Présent dans plus de 130 pays, TotalEnergies inscrit le développement durable dans toutes ses dimensions au cœur de ses projets et opérations pour contribuer au bien-être des populations.



À propos de Capgemini

Capgemini est un leader mondial, responsable et multiculturel, regroupant 290 000 personnes dans près de 50 pays. Partenaire stratégique des entreprises pour la transformation de leurs activités en tirant profit de toute la puissance de la technologie, le Groupe est guidé au quotidien par sa raison d'être : libérer les énergies humaines par la technologie pour un avenir inclusif et durable. Fort de plus de 50 ans d'expérience et d'une grande expertise des différents secteurs d'activité, Capgemini est reconnu par ses clients pour répondre à l'ensemble de leurs besoins, de la stratégie et du design jusqu'au management des opérations, en tirant parti des innovations dans les domaines en perpétuelle évolution du cloud, de la data, de l'Intelligence Artificielle, de la connectivité, des logiciels, de l'ingénierie digitale et des plateformes.

En partenariat avec

Colette Lewiner

et

