

LA CONNAISSANCE S'AMÉLIORE

mais le bilan reste toujours contrasté

L'ÉTAT DES MILIEUX

INTRODUCTION p. 47

LES EAUX CONTINENTALES p. 49

LES EAUX MARINES p. 69

LES SOLS p. 77

L'ATMOSPHÈRE p. 89

L'AIR EXTÉRIEUR p. 99

L'AIR INTÉRIEUR p. 116

L'atmosphère

L'atmosphère terrestre est une couche de gaz et de poussières de 500 km entourant la Terre. Elle assure la protection de la planète vis-à-vis des matériaux circulant dans l'Univers (astéroïdes, satellites, débris, etc.) susceptibles d'entrer en collision avec la Terre en raison de l'attraction qu'elle exerce. En traversant l'atmosphère, la plupart d'entre eux se désintègrent du fait de leur frottement sur l'air. L'atmosphère est constituée à 78 % d'azote, à 21 % d'oxygène et à 1 % d'argon. Elle contient aussi des gaz essentiels à la vie tels que les gaz à effet de serre (GES) ou l'ozone. **Les GES sont naturellement présents dans l'atmosphère et jouent un rôle important dans la régulation du climat.** Ils empêchent une large part de l'énergie solaire (les rayonnements infrarouges) d'être renvoyée de la Terre vers l'espace. Ce phénomène, appelé « effet de serre », assure une température moyenne sur Terre d'environ 15 °C qui, sans lui, serait de - 18 °C et rendrait la Terre inhabitable. **L'ozone** est présent dans toute l'atmosphère. Il est plus abondant dans la stratosphère, haute couche de l'atmosphère. Il s'y forme de manière naturelle à partir de l'action du rayonnement solaire sur l'oxygène. **La couche d'ozone** ainsi formée **filtre les rayonnements ultra-violet**s émis par le Soleil et protège les êtres vivants.

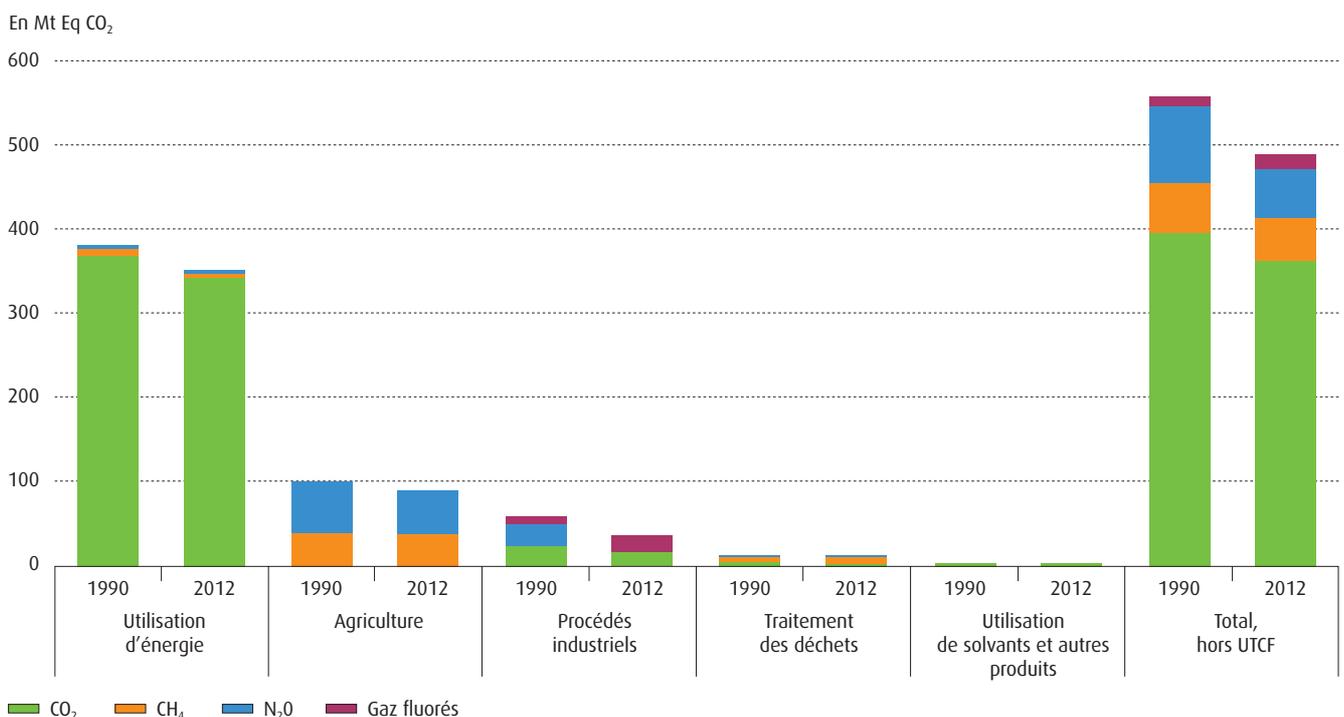
L'atmosphère et ces propriétés sont fragilisées par les émissions de polluants dans l'air issues des activités humaines.

Ces activités contribuent à l'augmentation des concentrations de GES dans l'atmosphère malgré le fait qu'une part du CO₂ émis est absorbée par les sols (*voir chap. « Les sols », p. 81*), les océans et les écosystèmes forestiers. Par conséquent, elles accentuent le réchauffement de la planète dont les effets sont perceptibles : les températures de l'atmosphère et des océans croissent, les surfaces et volumes de glace et de neige diminuent et le niveau moyen de la mer s'élève. De même, certains polluants émis dans l'air sont responsables de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique. Cette dernière ne s'est toujours pas reconstituée malgré les actions internationales conduites dès la fin des années 1980.

Les émissions de GES de la France

En France, les émissions de GES s'élèvent à 490 millions de tonnes équivalent CO₂ (Mt eqCO₂) en 2012 (Figure 63). Elles baissent de 12 % par rapport à 1990. Cette quantité n'intègre pas le solde des émissions/absorption de GES liées à l'utilisation des terres, leur changement et la forêt (UTCF), c'est-à-dire les émissions ou les captures (puits) de GES dues aux changements d'affectation des sols et à l'évolution du stock de carbone des forêts.

Figure 63 : évolution des émissions de GES en France



Note : sont incluses les émissions liées à l'utilisation énergétique en sylviculture et en agriculture ainsi que les émissions spécifiques liées à la pratique de l'agriculture (émissions des sols dues à l'épandage des fertilisants azotés, etc.). Sont exclues les émissions induites par l'utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCF) qui concerne les activités liées aux changements d'utilisation des terres, ainsi que les émissions/absorptions liées à la forêt.

Source : Citepa, inventaire CCNUC, mars 2014.

DONNÉES OU MÉTHODOLOGIE

L'évaluation des émissions de GES

Les émissions mondiales de GES sont suivies à l'échelle mondiale dans le cadre de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Un certain nombre de pays, dont la France, ont pris des engagements de réduction des émissions dans le cadre du protocole de Kyoto. Dans sa première période d'engagement de 2008 à 2012, ce protocole s'appliquait à six GES d'origine anthropique : le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O), ainsi que certains gaz fluorés (hydrofluorocarbures (HFC), perfluorocarbures (PFC), hexafluorure de soufre (SF_6)). Dans sa deuxième période d'engagement, à partir de 2013, il est étendu au trifluorure d'azote (NF_3).

La France a mis en place un système national d'inventaires des émissions de polluants atmosphériques et de GES. Ce système vise notamment à estimer les émissions de GES des différents secteurs d'activité. L'organisation et les méthodes d'établissement des inventaires nationaux des émissions atmosphériques, qui sont élaborées et contrôlées au niveau international, sont décrites dans le rapport méthodologique Ominea (Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France). Les émissions

de GES ne sont donc pas directement mesurées. Elles sont évaluées en s'appuyant sur les informations disponibles pour les différentes sources de GES : consommations de carburant, activités industrielles, cheptels, etc.

La contribution à l'effet de serre de chaque gaz se mesure grâce à son pouvoir de réchauffement global (PRG). Pour exprimer les émissions de GES en tonnes équivalent CO_2 (t eq CO_2), les émissions de chaque gaz sont pondérées par un coefficient tenant compte de son PRG comparé à celui du CO_2 .

Sur une période de cent ans, ce coefficient est par définition de 1 pour le CO_2 , de 21 pour le CH_4 , de 310 pour le N_2O et de 23 900 pour le SF_6 . Sur une période de 100 ans, un kilogramme de méthane a donc un impact sur l'effet de serre 21 fois plus fort qu'un kilogramme de CO_2 . Les HFC et les PFC recouvrent différentes molécules dont le PRG diffère. La valeur moyenne pondérée pour les HFC était par exemple de 4 987 en 1990 et de 1 949 en 2011. Les valeurs de PRG sont mises à jour en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques. À partir de 2015, les inventaires prendront en compte des données actualisées par le Giec (avec des valeurs de 25 pour le CH_4 et 298 pour le N_2O).

• L'utilisation de l'énergie, principale source d'émission de GES

En 2012, les émissions dues à l'utilisation d'énergie représentent 71,6 % des émissions totales de GES en France.

Elles sont constituées à plus de 90 % de CO_2 . Elles sont issues principalement de la consommation de combustibles et, dans une proportion marginale, de certaines combustions et fuites engendrées lors de l'extraction, du traitement et de la distribution des combustibles, dites « émissions fugitives ».

L'**agriculture** est la seconde source d'émission de GES en France, avec 18 % des émissions en 2012. Le secteur agricole est le premier émetteur de N_2O (88 % des émissions en 2012) et de CH_4 (75 % des émissions en 2012). Ses émissions de N_2O ont toutefois chuté de 16 % entre 1990 et 2012 en raison de la diminution des quantités d'engrais minéraux épandus sur les sols cultivés. Les émissions de CH_4 de l'agriculture, issues de la digestion des ruminants et de la gestion des déjections animales, ont aussi légèrement reculé sur cette période, de 2 %.

Les **procédés industriels**, représentent 7 % des émissions globales de GES en France en 2012. Ces dernières ont baissé de plus d'un tiers depuis 1990. Ce recul découle d'évolutions contrastées selon les GES. Entre 1990 et 2012, les émissions de N_2O ont chuté de 96 % suite à des améliorations techniques dans l'industrie chimique et à la fermeture de sites de production d'acide nitrique. Sur la même période, les émissions de gaz fluorés ont en revanche bondi de 80 % suite à l'utilisation croissante des HFC comme fluides frigorigènes ou comme agents propulseurs dans les mousses et aérosols.

Les émissions de GES engendrées par les **déchets**, composées à 77 % de CH_4 , représentent 3 % des émissions en France. Issues essentiellement de la mise en décharge des déchets organiques et du traitement des boues d'épuration, elles sont stables depuis 1990. Enfin, l'**utilisation de solvants** et de certains autres produits spécifiques, utilisés par exemple pour le nettoyage à sec ou le dégraissage des métaux, occasionne des émissions à hauteur de 0,2 % des émissions totales de GES en France.

ZOOM SUR...

Les émissions de GES dues à l'utilisation d'énergie

En 2012, le secteur des transports contribue pour 38 % aux émissions de GES liées à l'utilisation de l'énergie. Les autres principaux secteurs d'émission sont l'usage des bâtiments résidentiels et tertiaires (25 %), l'industrie manufacturière et la construction (18 %) et l'industrie de l'énergie (15 %) – (Figure 64).

Les émissions des transports ont rapidement augmenté entre 1990 et 2004, au rythme de + 1,2 % par an en moyenne pour atteindre 143 millions de tonnes (Mt) eqCO₂. Cette progression résulte de la forte croissance sur la période du trafic routier (+ 1,8 % annuel sur la période), responsable de plus de 90 % des émissions des transports. Ces émissions ont ensuite diminué entre 2004 et 2009, en raison de la moindre progression de la circulation routière voyageur et marchandise (+ 0,6 % annuel entre 2004 et 2009), plus que compensé par le renouvellement du parc automobile, soutenu par le bonus écologique et la prime à la casse, d'une part, et de la flambée des prix des carburants pétroliers et du déploiement des biocarburants, d'autre part. Depuis 2009, les émissions dues aux transports se sont stabilisées à 130 Mt eqCO₂ tandis que la circulation routière continue de progresser à un rythme de 0,7 % par an entre 2009 et 2012.

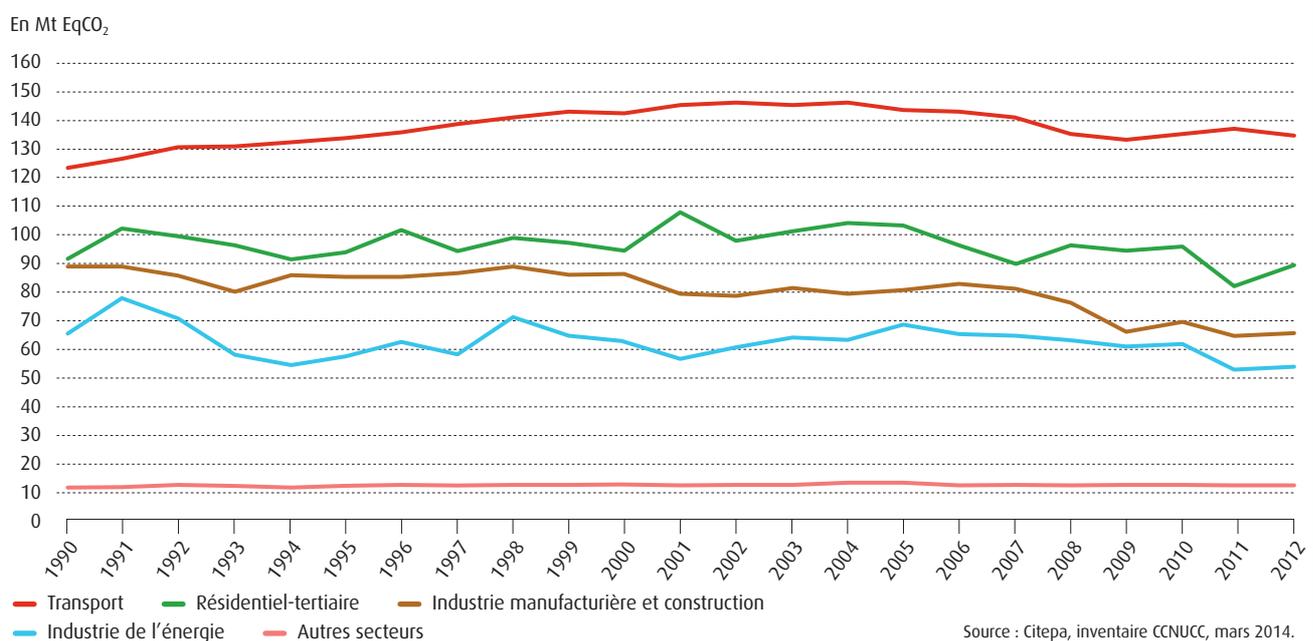
Les émissions du secteur résidentiel-tertiaire proviennent essentiellement du chauffage des bâtiments : elles sont donc particulièrement sensibles aux variations météorologiques. Entre 1990 et 2012, ces émissions ont fluctué entre 79 et 105 Mt eqCO₂, sans qu'une tendance nette ne se dégage. Depuis la fin des années 1970, la part des produits pétroliers et du charbon dans le mix énergétique du secteur résidentiel-tertiaire diminue au profit du gaz naturel et de l'électricité, moins émetteurs de CO₂. Cela a permis de contenir la progression des émissions du secteur, alors que sa consommation d'énergie est en croissance régulière.

Les émissions liées à la consommation de combustibles dans l'industrie manufacturière et la construction ont reculé d'un quart par rapport à 1990. Cette diminution s'est nettement accélérée sous l'effet de la crise économique de 2008 : - 5,2 % par an en moyenne entre 2008 et 2012, contre 0,7 % entre 1990 et 2008. L'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés de production ainsi que le rééquilibrage du mix énergétique au détriment du pétrole et du charbon ont aussi contribué à la baisse des émissions du secteur sur une longue période. En 2011, elles sont à leur plus bas niveau depuis 1970, à 63 Mt eqCO₂.

Les émissions dues à la combustion d'énergie dans l'industrie de l'énergie émanent à 70 % de la production d'électricité et de chaleur, le reste provenant du raffinage du pétrole et de la production de coke. En 2012, ces émissions s'établissent à 53 Mt eqCO₂. Comme dans le secteur résidentiel-tertiaire, elles fluctuent beaucoup selon la demande de chauffage et les conditions météorologiques. La grande majorité de la production électrique en France est assurée par les filières nucléaire (79 %) et hydraulique (10 %), qui ne sont pas émettrices de GES. Les centrales thermiques, qui brûlent essentiellement du pétrole, du charbon et du gaz naturel, servent d'appoint.

En 2012, les émissions fugitives représentent 1,2 % des émissions liées à l'utilisation d'énergie contre 2,5 % en 1990. Ce recul s'explique par la fermeture progressive des mines de charbon, sources de rejets de CH₄. Les émissions de CO₂ issues de la régénération du craqueur catalytique pour le raffinage du pétrole et celles de CH₄ échappées du réseau de transport et de distribution du gaz naturel constituent aujourd'hui la majorité des émissions fugitives.

Figure 64 : évolution des émissions de GES dues à la consommation de combustibles en France



• Les écosystèmes forestiers participent à l'atténuation de l'effet de serre

Les écosystèmes forestiers (voir chap. « La ressource Bois », p. 176) **jouent un rôle important dans le cycle mondial du carbone.** Le CO₂ atmosphérique est fixé par les végétaux lors de leur croissance. Ce processus représente le flux de carbone entrant dans l'écosystème. Le carbone accumulé au fil des années dans la biomasse des arbres au niveau de leurs troncs, branches, brindilles, feuilles et racines constitue un stock. À la mort des tissus ou des arbres, ce stock rejoint celui de la biomasse morte au sol (feuilles et branches mortes), puis une partie gagne celui de l'humus et enfin celui des sols. Au fur et à mesure de la dégradation de la matière organique, le carbone retourne à l'atmosphère par minéralisation. Le carbone des arbres peut également être extrait des écosystèmes forestiers comme lors de la récolte des troncs. Dans ce cas la décomposition de la matière organique se réalise ailleurs qu'en forêt et selon un pas de temps variable selon les usages du bois. Ces processus représentent les flux de carbone sortant de l'écosystème, ou émissions.

Le stock de carbone dans la biomasse des arbres vivants des forêts de production de France métropolitaine est estimé en 2010 à 1 137 Mt. La quantité de carbone stockée dans les 30 premiers centimètres des sols forestiers et dans la litière (biomasse morte au sol et humus) est équivalente à celle de la biomasse vivante (Maaf - IFN, 2011).

Le bilan entre la séquestration et les émissions de CO₂ d'origine forestière d'un territoire varie au rythme du développement de la superficie forestière et de la maturité des arbres. La forêt française séquestre du CO₂ atmosphérique, c'est un puits de CO₂. Sur la période 2005-2011 incluant la tempête de 2009 en Aquitaine, de l'ordre de 17 Mt de carbone ont été stockées en

plus chaque année dans la biomasse des forêts métropolitaines, soit environ 62 Mt CO₂/an (source IGN non publiée). Ce puits est la conséquence directe de volumes de prélèvements globalement inférieurs à la production biologique, notamment en raison (IFN, 2011 et IGN, 2013) d'une expansion forte de la superficie forestière au cours des dernières décennies induisant une dynamique de capitalisation en cours dans les « nouvelles forêts » et d'un déficit localisé d'exploitation. Dans l'enquête Forest Europe 2011, la France métropolitaine occupe la troisième position en Europe (hors Russie) pour l'importance du puits de CO₂ dans la biomasse entre 2000 et 2010, derrière l'Allemagne et la Pologne.

Au-delà du stockage en forêt, l'activité forêt-bois en France contribue à l'atténuation des effets du changement climatique, sous diverses formes complémentaires. L'exploitation des forêts conduit à stocker le CO₂ des arbres sous la forme de produits bois, principalement pour la construction et l'ameublement. Les produits bois représentent ainsi un puits annuel estimé à 4 Mt CO₂ en France (DGEC, 2013). Par ailleurs, l'utilisation du bois comme matériau de construction et source d'énergie renouvelable permet d'éviter les émissions dans l'atmosphère de carbone fossile, respectivement pour la production d'acier, aluminium, béton, etc., et pour la production d'énergie sous forme de chaleur, électricité, etc. (Lippke *et al.*, 2011, Fortin *et al.*, 2012).

La CCNUC et le Protocole de Kyoto reconnaissent la capacité des écosystèmes forestiers à atténuer les conséquences d'une augmentation de l'effet de serre. Un mécanisme de compensation spécifique et conditionné des émissions anthropiques de CO₂ est permis au travers du secteur de l'utilisation des terres, de leurs changements et de la foresterie (LULUCF en anglais). **La forêt de France métropolitaine et des DOM a ainsi permis de compenser 9,1 % des émissions annuelles de GES en 2011** (Citepa, 2013).

ZOOM SUR...

Les puits de carbone

Des quantités très importantes de CO₂ sont échangées entre la végétation et l'atmosphère (par photosynthèse de la végétation et décomposition des organismes), et entre l'atmosphère et les couches de l'océan les plus proches de la surface.

Les échanges dans chacun des sens sont très importants ; ils étaient en moyenne proches de l'équilibre jusqu'au siècle dernier. Du fait de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ induite par la déforestation et l'utilisation de combustibles fossiles, **l'océan capte aujourd'hui plus de CO₂ dans les zones froides qu'il n'en relargue dans les régions chaudes** d'une part et **la photosynthèse de la végétation terrestre augmente** d'autre part. Tant que le climat n'est pas trop modifié, l'effet net est donc un stockage de CO₂ par les océans et la végétation terrestre, dénommé « **puits** » de CO₂. Il est estimé aujourd'hui que plus de la moitié des émissions nettes de CO₂ par l'Homme sont ainsi captées par les océans et la végétation terrestre.

Mais au fur et à mesure que le climat se réchauffera, les zones océaniques relarguant du CO₂ s'étendront et la décomposition des organismes s'accroîtra plus vite que la photosynthèse dans de vastes régions au point que cet effet de puits de CO₂ diminuera. Une part plus importante de la couverture végétale terrestre pourrait se retrouver dans des conditions hydriques plus difficiles, ce qui contribuera encore à diminuer le puits, voire à l'inverser temporairement.

Le rôle stabilisateur joué par la végétation et les océans est donc fragile. À des échelles de temps plus longues (quelques siècles), l'essentiel du CO₂ injecté dans l'atmosphère par l'Homme se retrouvera dans l'océan profond, qui constitue déjà le plus grand réservoir de carbone à la surface terrestre. Si le captage de CO₂ par l'océan a un effet stabilisateur sur le climat, il ne faut pas oublier que cela conduit aussi à son acidification, phénomène néfaste pour la croissance de certains organismes (phytoplancton, corail, etc.).

COMPARAISON INTERNATIONALE

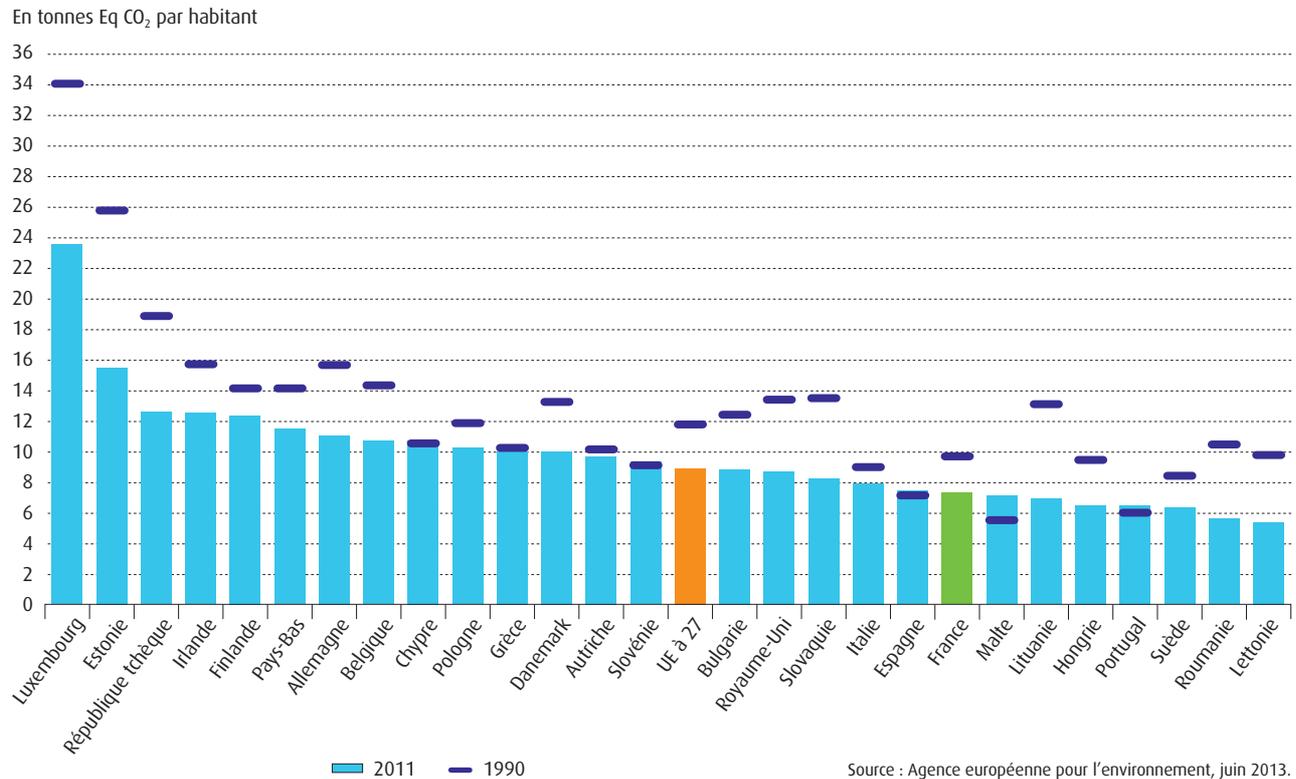
Les émissions de GES en Europe

Les émissions de GES dans l'Union européenne s'élèvent à 4 143 Mt eqCO₂ en 2011, en baisse de 18 % par rapport à 1990. En 2011, l'Allemagne est de loin le premier pays émetteur de GES (916 Mt eqCO₂), devant le Royaume-Uni (553 Mt eqCO₂), l'Italie (489 Mt eqCO₂) et la France (486 Mt eqCO₂). Ces quatre pays sont à l'origine de plus de la moitié des émissions totales de l'Union européenne (54 % en 2011, 55 % en 1990). Par rapport à 1990, les émissions de GES ont reculé dans presque tous les pays. En Allemagne et au Royaume-Uni, elles ont chuté de plus d'un quart ; la baisse se concentre surtout dans le secteur de l'industrie, y compris la transformation d'énergie. À l'inverse, les émissions ont augmenté d'un quart en Espagne, en raison notamment du développement du transport routier.

Rapportées au nombre d'habitants, les émissions de GES dans l'Union européenne ont aussi diminué. En 2011, elles s'établissent à 9,1 t eqCO₂/habitant, soit 24 % en dessous de

leur niveau de 1990. Elles ont reculé ou stagné dans tous les États membres, hormis à Malte et dans une moindre mesure au Portugal. En 2011, c'est au Luxembourg (23,6 t eqCO₂/hab) qu'elles sont les plus importantes (Figure 65). Mais il s'agit d'un effet de la fiscalité avantageuse des carburants incitant les résidents des pays limitrophes à venir s'y approvisionner. Elles sont élevées aussi en Estonie (15,6 t eqCO₂/hab), et dans une moindre mesure en Allemagne et en Pologne en raison de l'importance du charbon dans leur bouquet électrique. L'Irlande fait également partie des pays les plus émetteurs (12,7 t eqCO₂ /hab) à cause de l'importance du secteur agricole : les émissions liées à l'agriculture y sont de 3,9 t eqCO₂/hab contre 0,9 t eqCO₂/hab seulement en moyenne dans l'Union européenne. À l'opposé, les émissions par habitant sont plus faibles en France et en Suède en raison d'une production électrique largement assise sur les énergies nucléaire et hydraulique.

Figure 65 : évolution des émissions de GES par habitant dans l'Union européenne



Les émissions de GES dues à la consommation des Français

L'empreinte carbone induite par la consommation fournit une information complémentaire à celle des inventaires de GES réalisés au titre des engagements pris par la France dans la CCNUCC et dans le Protocole de Kyoto. Ces inventaires portent uniquement sur les GES émis à partir du territoire national alors que l'empreinte prend en compte les importations et les exportations.

Dans le contexte d'une économie mondialisée, il apparaît en effet nécessaire de tenir compte des émissions liées à l'ensemble des biens et services consommés, y compris celles qui interviennent hors du territoire national, ainsi que des éventuels transferts d'activités vers d'autres pays.

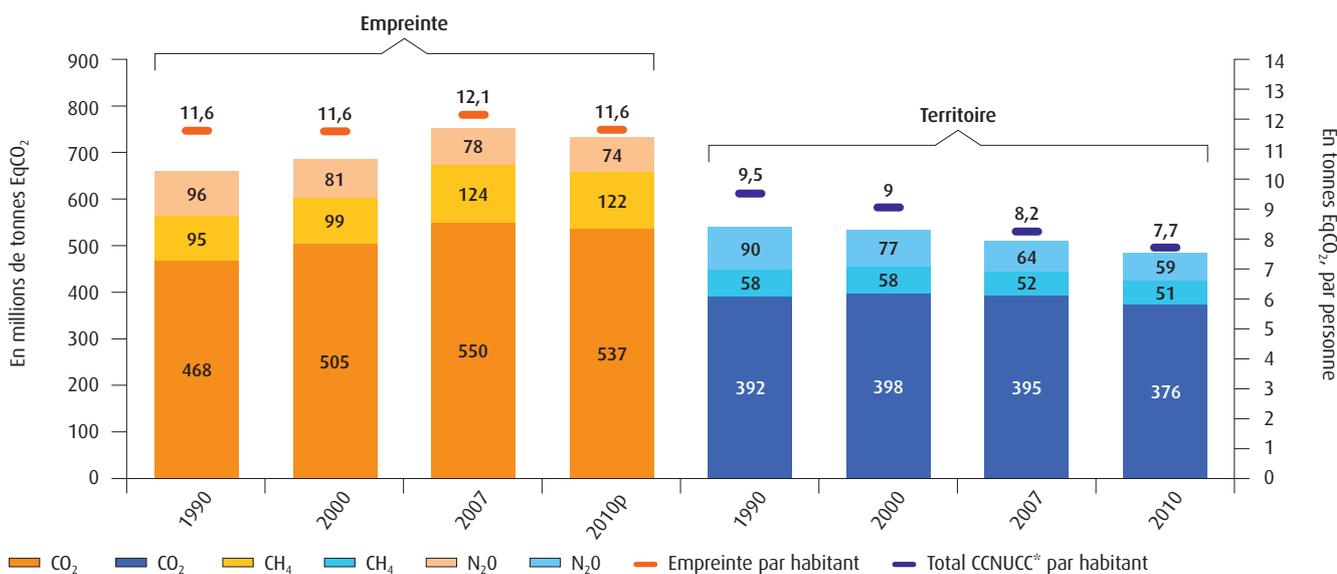
Ainsi, l'empreinte carbone inclut les GES directement émis par les ménages (chaudières, véhicules individuels) et les émissions générées lors de la fabrication et du transport des produits consommés par ces derniers, que ces produits soient fabriqués en France ou à l'étranger.

• L'empreinte carbone des Français ne diminue pas malgré la réduction des émissions de GES sur le territoire

En 2010, l'empreinte carbone des Français (733 Mt eqCO₂) est supérieure de 50 % à la quantité des trois GES pris en considération (CO₂, CH₄ et N₂O) émise sur le territoire métropolitain (486 Mt eqCO₂) – (Figure 66). Elle est également en hausse de 11 % par rapport à son niveau de 1990, alors que sur la même période, les émissions de GES sur le territoire ont baissé de 10 %. Rapportée à la taille de la population, l'empreinte carbone d'un Français est en moyenne de 11,6 t eqCO₂ en 2010 contre 7,7 t eqCO₂ pour les trois mêmes GES émis sur le territoire métropolitain.

Compte tenu de l'évolution de la population, l'empreinte carbone moyenne des français en 2010, année encore marquée par un ralentissement de la demande intérieure consécutif à la récession des deux années précédentes, est identique à celle de 1990. Sur la même période, le niveau moyen des émissions par habitant sur le territoire a diminué de 19 %. Depuis 1990, les émissions associées aux importations se sont accrues de 62 % ; elles représentent la moitié de l'empreinte carbone des Français en 2010.

Figure 66 : évolution de l'empreinte carbone versus émissions sur le territoire de la France



Note : * CCNUCC (France métropolitaine) ; P : estimation provisoire réalisée à partir d'un calcul agrégé, i.e. sans détail par catégorie de biens et services.

Source : AIE, Citepa, Douanes, Eurostat, Insee. Traitements : SOeS, 2013.

DONNÉES OU MÉTHODOLOGIE

Le périmètre de l'empreinte carbone

L'empreinte carbone calculée par le Service de l'observation et des statistiques (SOeS) représente la quantité de GES, exprimée en tonnes équivalent CO₂ (t eqCO₂), émise pour satisfaire la consommation française. Elle ne prend en considération que trois GES : CO₂, CH₄ et N₂O, qui représentent 97 % du potentiel de réchauffement global des six GES pris en compte par le protocole de Kyoto. L'empreinte est composée d'une partie intérieure et d'une partie importée. La première regroupe les émissions directes des ménages (voiture et chauffage individuels) et les émissions des établissements industriels, commerciaux et

administratifs qui produisent les biens et services destinés à la demande intérieure, les émissions associées aux exportations étant exclues. La partie importée correspond aux émissions générées à l'étranger lors de la fabrication et le transport des biens et services importés en France. Ces importations sont destinées soit à un usage productif (matières premières ou biens semi-finis), soit à un usage final, notamment par les ménages. La partie des émissions associée à des importations françaises qui sont réexportées, après transformation ou non, est exclue de l'empreinte.

En 2007, dernière année pour laquelle le SOeS a réalisé le calcul de l'empreinte carbone détaillé par biens et services, le transport (21 %, dont 17 % pour les voitures particulières des ménages), l'alimentation (18 %), le logement (16 %) et les services (16 %) représentaient ensemble plus des deux tiers de l'empreinte carbone des Français.

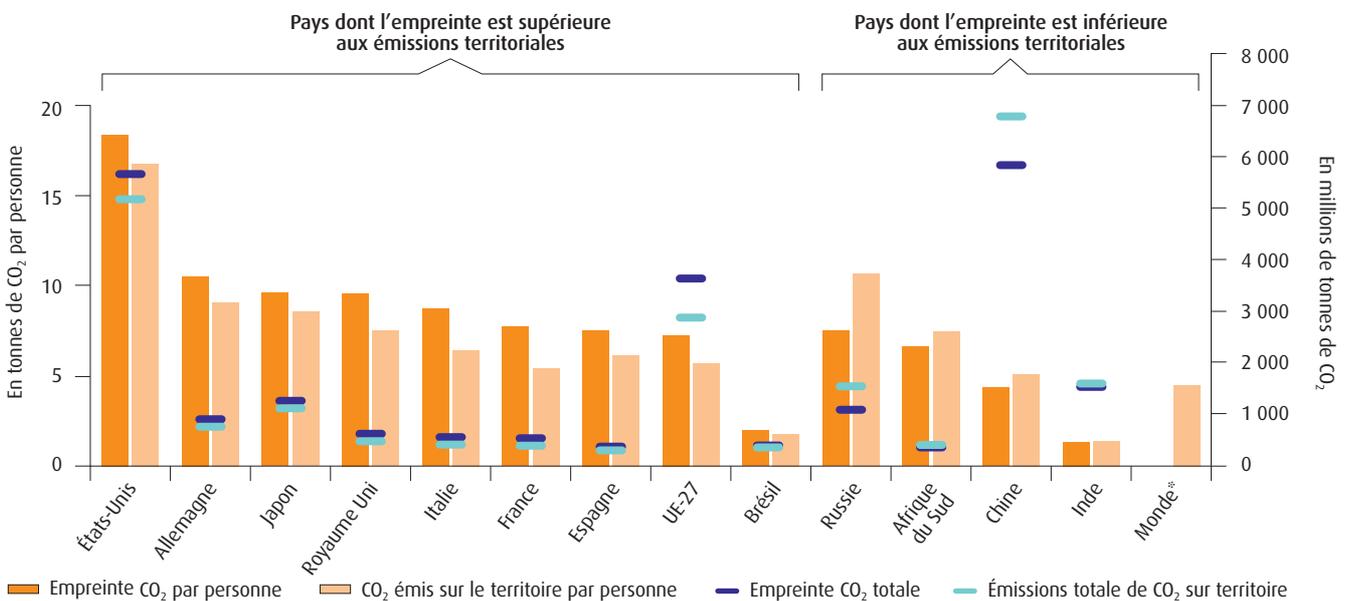
• Les émissions de GES à l'étranger, une caractéristique commune des pays développés

Les estimations réalisées par l'OCDE permettent d'établir une comparaison internationale de l'empreinte CO₂ pour l'année 2009⁵. Les pays de grande taille d'Europe occidentale, les États-Unis et le Japon ont une empreinte CO₂ supérieure au CO₂ émis sur leur territoire (Figure 67). En revanche, l'Afrique du Sud, la Chine, l'Inde et la Russie présentent une situation inversée ; le Brésil affiche une position particulière avec un niveau moyen d'émissions par habitant relativement bas et une empreinte légèrement supérieure aux émissions sur son territoire. Dorénavant, compte tenu de sa taille et de sa croissance économique, la Chine est le premier émetteur mondial de CO₂. Toutefois, le niveau de son empreinte CO₂ moyenne par personne (4,4 t/hab) était encore nettement inférieur à celui de l'Union européenne (7,3 t/hab) ou plus largement des pays de l'OCDE (9,5 t/hab).

Plusieurs études⁶ ont montré l'existence d'un « transfert », via le commerce international, d'émissions de CO₂ de l'ensemble des pays ayant des engagements de réduction d'émissions de GES dans le cadre du protocole de Kyoto vers les pays tiers. Depuis la signature du protocole en 1997, les premiers ont collectivement stabilisé les émissions de CO₂ sur leur territoire, alors qu'augmentaient les émissions de CO₂ liées à leurs importations en provenance des pays hors du protocole ; l'ensemble des émissions de ces derniers ont quasi-doublé depuis cette date.

L'objectif de limiter à 2 °C l'augmentation de température moyenne mondiale par rapport à l'époque préindustrielle, reconnu en 2010 par les Parties à la CCNUCC comme étant central, après que le Giec ait indiqué qu'au-delà de ce seuil les conséquences induites par le changement climatique seraient d'une ampleur significative, **nécessite de réduire les émissions mondiales de GES de moitié à l'horizon de 2050 par rapport au niveau de 1990**, soit un peu plus de 20 milliards de tonnes eqCO₂ par an. Compte tenu de la taille de la population à cet horizon (9 milliards d'individus), un partage équitable des émissions requerrait, dans chacun des pays, de ne pas excéder 2,5 t eqCO₂ de GES par habitant et par an, dont 2 tonnes pour le CO₂. Les progrès techniques ne permettront pas à eux seuls d'atteindre un tel objectif. Celui-ci nécessitera des changements dans les modes de vie⁷.

Figure 67 : comparaison internationale de l'empreinte CO₂ de la demande finale intérieure et du CO₂ émis sur le territoire (année 2009)



Note de lecture : pour chacun des pays, le graphique indique l'empreinte CO₂ (couleurs foncées) et le CO₂ émis sur le territoire (couleurs claires). En outre, l'information présentée porte à la fois sur les émissions rapportées à la taille de la population (barres orange, échelle de gauche) et les émissions totales (tirets bleus, échelle de droite).
 Note : * à l'échelle mondiale, le total des émissions est égal à l'empreinte. Les données de l'OCDE portent sur le CO₂ issu de la combustion des énergies fossiles ; elles n'incluent pas le CO₂ hors combustion (e.g. décarbonation du calcaire lors de la fabrication du ciment).

Source : OCDE.

⁶ Peters G., Minx J., Weber C., Edenhofer O., 2011. - « Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008 », Proceedings of the National Academy of Science (PNAS) of the USA - 6 p. + Excel worksheets. (<http://www.pnas.org/content/early/2011/04/19/1006388108.abstract>)
 Aichele A., Felbermayr G., 2012. « Kyoto and the carbon footprint of nations », Journal of Environmental Economics and Management, vol. 63(3), pp. 336-354.
 Boitier B., 2012. « CO₂ Emissions Production-Based Accounting vs. Consumption: Insights from the WIOD Databases », Final WIOD Conference: Causes and Consequences of Globalization, Groningen, The Netherlands, April 24-26, 2012, 23 p. (http://www.wiod.org/conferences/groningen/paper_Boitier.pdf)
⁷ Iddri, 2013. « Modes de vie et empreinte carbone Prospective des modes de vie en France à l'horizon 2050 et empreinte carbone ». Les cahiers du Club d'ingénierie prospective énergie et environnement (CLIP) n° 21, décembre 2012 - 130 p.

⁵ 2009 est une année particulière. Les émissions de CO₂ de la plupart des pays, à la fois leur empreinte et les émissions sur leur territoire, ont diminué en raison de la baisse de l'activité économique.

Les effets du changement climatique en France

Comme le souligne le Giec dans son 5^e rapport publié en septembre 2013, les températures de l'atmosphère et des océans croissent, les surfaces et volumes de glaces continentales et de neige diminuent et le niveau moyen de la mer s'élève. Ainsi au niveau mondial, la température moyenne de surface s'est élevée de 0,85 °C entre 1880 et 2012. La vitesse de ce réchauffement et de la remontée du niveau marin est sans équivalent depuis plusieurs milliers d'année. Les activités humaines sont la cause principale de cette évolution rapide du climat.

• La hausse des températures est plus forte en France qu'à l'échelle mondiale

En France métropolitaine, la hausse des températures depuis 1900 (Figure 68) est légèrement supérieure à la moyenne mondiale (0,92 °C contre 0,85 °C). Cette hausse fait toutefois l'objet de fortes disparités selon les régions. Elle est de l'ordre de 0,7 °C pour le Nord-Est du pays contre 1,1 °C pour le Sud-Ouest.

En outre-mer, les données disponibles font état d'une élévation des températures de l'ordre de 0,62 °C à la Réunion (1969-2008), 1,3 °C aux îles Kerguelen depuis les années 1960, de 1,3 °C à Nouméa (1970-2009), 1,05 °C en Polynésie Française (1976-2003), 1,3 °C en Guyane (1955-2009) et 1,47 °C en Martinique (1965-2009) – (source : Météo France-Onerc, 2012).

La hausse des températures du globe induit également une hausse graduelle du niveau marin suite à la fonte des glaces continentales et à la dilatation des eaux sous l'effet de la chaleur. Le niveau marin s'est élevé de $1,7 \pm 0,3$ mm/an sur la période 1901-2010. Cette tendance s'est accélérée durant les dernières décennies pour atteindre $3,2 \pm 0,4$ mm/an sur la période 1993-2010. En France métropolitaine et en outre-mer, la tendance est similaire ou supérieure.

Si à l'heure actuelle aucune évolution du régime des tempêtes et vents violents sur le territoire n'est détectée, les vagues de chaleur connaissent déjà une évolution notable depuis le milieu du siècle (Figure 69).

Une vague de chaleur est définie comme une période où les températures minimales et maximales, moyennées sur trois jours, atteignent ou dépassent simultanément des seuils d'alerte départementaux. Les canicules de 2003 et de 2006 ont causé une surmortalité respectivement de 15 000 et 2 000 décès en France. La surmortalité est estimée comme la différence entre la mortalité observée durant la période de vague de chaleur et les trois jours

suivants et une mortalité de référence calculée pour la même période des années précédentes, jusqu'à cinq années précédant la vague de chaleur. L'impact des vagues de chaleur de 2010, 2011 et 2012, plus modestes, est en revanche moindre, l'Institut de veille sanitaire (InVS) évaluant globalement la surmortalité à 84 personnes sur les 41 départements étudiés (source : bulletin épidémiologique hebdomadaire de l'InVS).

• Des projections encore incertaines

Selon les choix de développement économique qui seront faits dans les prochaines années, le réchauffement climatique pourrait atteindre + 1,7 à 5 °C en métropole à la fin du siècle (Jouzel *et al.*, 2012). En outre-mer, la hausse sera moindre, de l'ordre de 1 à 3 °C, notamment à cause de l'effet amortisseur des masses océaniques (Onerc, 2012).

Sachant qu'une élévation de température moyenne de + 1°C en plaine est considérée comme étant équivalente à un déplacement de 180 km vers le sud ou à une perte d'altitude de 160 mètres en montagne, la hausse des températures moyennes pourrait donc grandement affecter les écosystèmes à un rythme jamais vu depuis plusieurs milliers d'années.

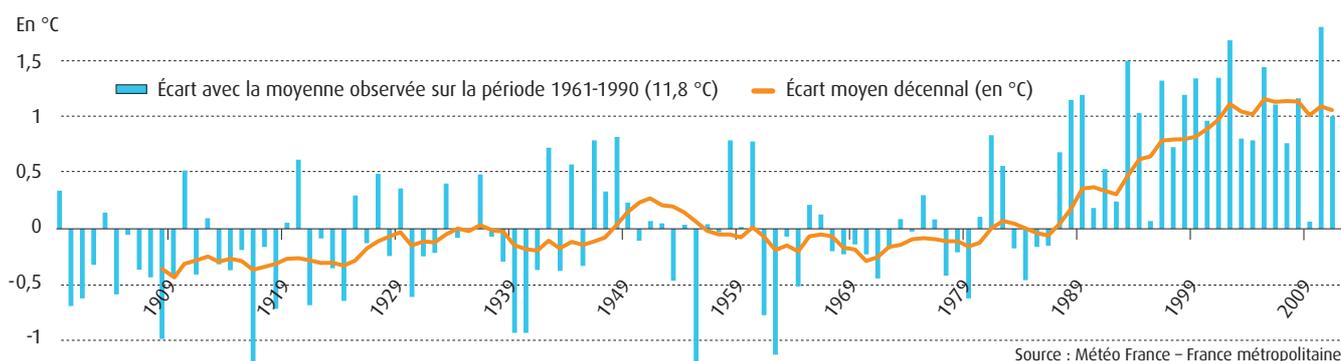
Les projections actuelles relatives aux précipitations en métropole ne permettent pas de dégager de tendance marquée en moyenne annuelle : néanmoins, certains modèles anticipent des réductions de précipitations en été (Jouzel *et al.*, 2012). En outre-mer, une légère baisse est anticipée (Onerc, 2012). Toutefois, la hausse des températures va entraîner une augmentation significative de l'évapotranspiration et une modification des écoulements liés à la fonte des neiges. L'écoulement des cours d'eaux sera de fait perturbé : les débits pourraient diminuer de 20 à 30 % en moyenne à l'horizon 2060 avec une réduction drastique des niveaux d'étiage notamment dans le Sud-Ouest (Boë, 2007 ; Medde, 2013) - (voir chap. « La ressource en eau », p. 172).

Les vents violents ne devraient pas connaître d'évolution discernable en métropole. Dans les outre-mer tropicaux, la fréquence des vents violents ne devrait pas évoluer. Leur intensité devrait en revanche croître.

Les vagues de chaleurs seront plus fréquentes et plus intenses. Sur la base des tendances d'émissions de GES actuelles, une canicule de type de celle de 2003 aura une chance sur deux de se produire en été d'ici la fin du siècle (Onerc, 2009).

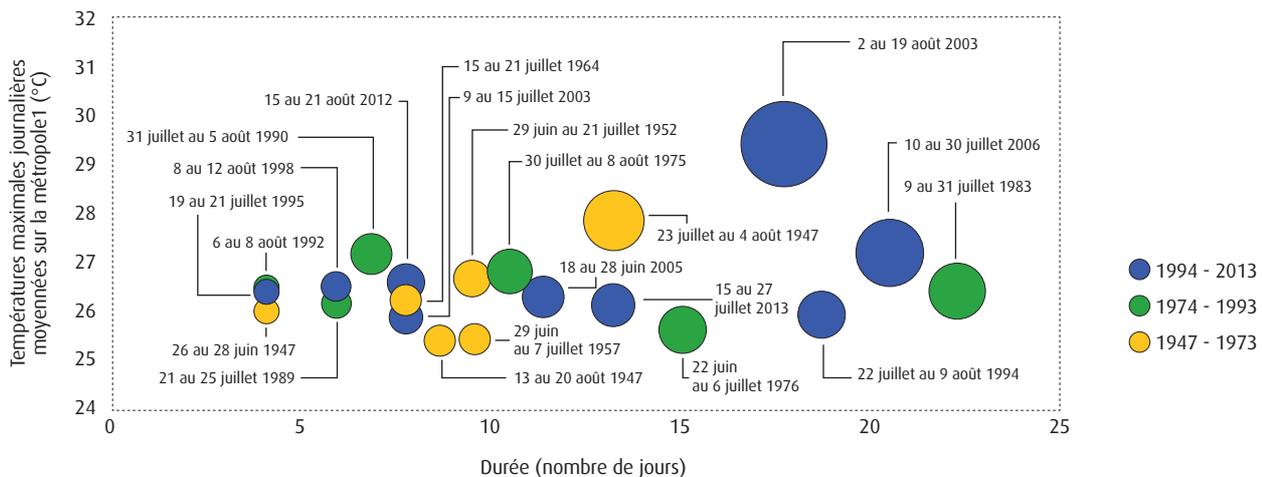
La hausse du niveau marin d'ici la fin du siècle sera probablement comprise entre 40 et 60 cm, une valeur extrême de un mètre n'étant pas à exclure (Onerc, 2010).

Figure 68 : évolution de la température moyenne en France métropolitaine



Source : Météo France – France métropolitaine.

Figure 69 : comparatif des vagues de chaleur sur la période 1947-2011 en métropole



Note : la moyenne est obtenue à partir d'une sélection de trente villes réparties sur l'ensemble du territoire. La surface des disques représente l'intensité globale des vagues de chaleur qui dépend à la fois de leur durée et des températures atteintes.

Source : Météo-France, 2013.

L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique

L'ozone stratosphérique désigne la couche située entre 20 et 50 km d'altitude, autrement appelée couche d'ozone. L'ozone stratosphérique se distingue de l'ozone troposphérique formé dans la troposphère (couche située entre le sol et 7 à 12 km d'altitude) - (voir chap. « Air extérieur », p. 109).

La couche d'ozone stratosphérique joue un rôle protecteur pour les êtres vivants en filtrant une grande partie des rayonnements ultraviolets (UV) solaires principalement les UVC et les UVB. Une surexposition aux UV peut avoir des effets sur la santé humaine (cataractes, cancers de la peau) ainsi que sur les végétaux. **Depuis les années 1980, les observations montrent des diminutions saisonnières importantes de l'ozone stratosphérique au-dessus de l'Arctique et du continent Antarctique.** Ces baisses peuvent atteindre 50 % à la fin de l'hiver et au début du printemps. Elles se répercutent également, de façon moins prononcée, aux moyennes latitudes. L'amincissement de la couche d'ozone concerne les régions polaires durant le printemps.

L'appauvrissement de la couche d'ozone fait suite à des réactions chimiques complexes intervenant dans la stratosphère. Elles font intervenir des composés bromés ou chlorés et nécessitent des températures très basses, atteintes durant les hivers polaires, puis des rayonnements solaires importants, dès le printemps suivant. Ces composés sont émis par les activités humaines. Les plus connus sont :

- les chlorofluorocarbures (CFC), utilisés dans des systèmes réfrigérants, climatisations, bombes aérosols, solvants, etc. ;
- les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), développés en remplacement des CFC en raison de leur moindre durée de vie dans l'atmosphère et les hydrofluorocarbures (HFC), utilisés comme substitut aux HCFC ;
- les halons, utilisés pour les extincteurs et les systèmes de protection contre les incendies. Ils ont un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone très élevé ;
- le tétrachlorure de carbone, utilisé notamment comme solvant de nettoyage industriel ;

- le bromure de méthyle, utilisé pour le traitement des végétaux, des locaux et sols agricoles par fumigation.

Pour préserver la couche d'ozone, la communauté internationale s'est engagée depuis 1987 dans le **Protocole de Montréal** relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Ce Protocole vise à cesser progressivement la production et la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone. Le nombre de pays signataires de ce protocole est passé de 24 en 1987 à 197 en 2013.

Sur la période 1988-2010, les émissions mondiales de ces produits ont chuté de plus de 80 %. 98 % des produits chimiques contrôlés par le Protocole ont été éliminés. Sur le plan de la santé publique, le Protocole de Montréal a permis d'épargner à la communauté internationale des millions de cas de cancers mortels de la peau et plusieurs millions de cas de cancers bénins de la peau et de cataractes. Pour atteindre les objectifs fixés par le Protocole de Montréal, des produits de substitution ont été mis sur le marché pour remplacer les CFC. C'est notamment le cas des HFC.

Néanmoins, **les CFC et les halons ont une durée de vie très longue dans l'atmosphère.** Les modèles scientifiques prévoient une **dissipation du trou d'ozone et un retour progressif à la normale, c'est-à-dire la situation antérieure aux années 1980, pour 2050 à 2080.**

Le Protocole de Montréal joue aussi un rôle très important dans la lutte contre le changement climatique, puisque les substances appauvrissant la couche d'ozone sont également de puissants GES. C'est notamment le cas des CFC et des HCFC. Le Protocole a ainsi empêché jusqu'à aujourd'hui l'émission, à l'échelle mondiale, de 135 milliards de tonnes équivalent CO₂. Cette évaluation ne concerne que l'impact des substances appauvrissant la couche d'ozone (dont les CFC et les HCFC qui peuvent être caractérisés par des potentiels de réchauffement climatiques pouvant être très élevés). Elle ne prend pas en compte l'impact des HFC. Or les HFC sont des GES à fort potentiel de réchauffement climatique. Sur la période 1990-2011, leurs émissions ont augmenté de 322 %. Des négociations internationales sont en cours pour en réduire la production et la consommation.

Pour en savoir plus...

Bibliographie

- Boë J., 2007. – **Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France** (*Thèse de doctorat*) – Toulouse : Université Paul Sabatier – 278 p. (http://thesesups.ups-tlse.fr/227/1/Boe_Julien.pdf)
- Citepa, 2014. – **Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto** (rapport CCNUCC, édition mars 2014) – Paris : Citepa – 294 p. + méthodologie détaillée (<http://www.citepa.org/fr/actualites/1508-31-mars-2014-citepa-publication-de-2-rapports-d-inventaires>)
- Medde-CGDD-SOeS, Medde-DGEC-SCEE, CDC Climat Recherche, 2014. – **Chiffres clés du climat : France et Monde - Edition 2014 (Vagues de chaleur en France entre 1947 et 2013, p.3)** – Paris : SOeS – 48 p. (coll. *Repères*). (http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Temis/0062/Temis-0062856/17567_2014.pdf)
- Medde-CGDD-SOeS, 2012. – « **L'empreinte carbone de la consommation des Français : évolution de 1990 à 2007** », *Le Point sur*, n°114, mars 2012 – 4 p. (<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/1939/1178/lempreinte-carbone-consommation-francais-evolution-1990.html>)
- European Environment Agency, 2012. – **Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe 2012** – Luxembourg : Office for Official Publications of the European Union – 300 p. (<http://www.eea.europa.eu/publications/climate-impacts-and-vulnerability-2012>)
- Giec, 2013. – **5^e rapport d'évaluation du Giec, Vol.1 : changement climatique 2013 - les éléments scientifiques** – New-York : Cambridge University Press – 1308 p. (<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>)
- Giec, 2013. – **5^e rapport d'évaluation du Giec, Vol.1 : changement climatique 2013 - les éléments scientifiques (Résumé à l'intention des décideurs, pp.1-36)** – New-York : Cambridge University Press – 1308 p. (http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf)
- Giec, 2014. – **5^e rapport d'évaluation du Giec, Vol.2 : changement climatique 2014 – impacts, vulnérabilité et adaptation** – New-York : Cambridge University Press (<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>)
- Jouzel J. (sous la dir), 2012. – **Le climat de la France au XXI^e siècle, Vol.2 : Scénarios régionalisés - Indices de référence pour la métropole** – Paris : Meddtl – 305 p. (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_IM_p2.pdf)
- Jouzel J. (sous la dir), 2012. – **Le climat de la France au XXI^e siècle, Vol.3 : Évolution du niveau de la mer** – Paris : Meddtl – 51 p. (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Rapport_niveau_de_la_mer_Web_VF.pdf)
- Medde-Onerc, 2013. – **Changement climatique : impacts en France** – Paris : Medde – 16 p. (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/livret_indicateurs.pdf)
- Medde-Onerc, 2012. – **Les outre-mer face au défi du changement climatique (rapport au Premier ministre et au Parlement)** – Paris : La Documentation française – 216 p. (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_rapport_2012.pdf)
- Medde-Onerc, 2010. – **Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles (Synthèse)** – Paris : DGEC – 6 p. (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/synth_niveau_mer.pdf)
- Medde-Onerc, 2009. – **Changement climatique : coûts des impacts et pistes d'adaptation (rapport au Premier ministre et au Parlement)** – Paris : La Documentation française – 194 p. (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/spipwwwmedad/pdf/rapport_onerc_cle098a8d-1.pdf)
- Medde-Onerc, 2007. – **Changements climatiques et risques sanitaires en France (rapport au Premier ministre au Parlement)** – Paris : La Documentation française – 208 p. (<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/074000568/0000.pdf>)

Sites internet utiles

- Bulletin épidémiologique hebdomadaire du 5 juin 2007, n°22-23. – InVS : www.invs.sante.fr/display/?doc=beh/index.html
- Bulletin épidémiologique hebdomadaire du 9 avril 2013, n°11. – InVS : www.invs.sante.fr/Publications-et-outils/BEH-Bulletin-epidemiologique-hebdomadaire/Archives/2013/BEH-n-11-2013
- Giec : www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml
- **La couche d'ozone et le trou d'ozone** (*dossier réalisé par Aude Mieville*) – Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) : www.ipsl.fr/fr/Pour-tous/Les-dossiers-thematiques/La-couche-d-ozone-et-le-trou-d-ozone – rubrique « Pour tous » > « Les dossiers thématiques »
- Onerc : www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation-et-missions.html