ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

ATTRIBUTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'ACTIVITÉ HUMAINE

Valérie Masson-Delmotte
Membre de l'Académie des technologies

Séance du 22 novembre 2023

Résumé

Dans le contexte de l'intensification des changements observés dans l'ensemble du système climatique et de leurs impacts, la démarche d'attribution consiste à évaluer la contribution d'un ou plusieurs facteurs naturels et anthropiques à un changement ou un évènement observés. Un ensemble de méthodes d'attribution qui s'appuient sur l'utilisation combinée d'observations et de compréhension théorique ainsi que de modèles de climat a progressé depuis 40 ans, à partir du travail pionnier de Klaus Hasselmann (co-lauréat du Prix Nobel de Physique en 2021). Elles sont mises en œuvre pour évaluer l'influence humaine sur les indicateurs clés du climat à l'échelle planétaire, ou pour une région donnée, comme la France, ou pour un évènement météorologique ou climatique extrême à fort impact.

En ce qui concerne la composition atmosphérique, il est sans équivoque que la hausse brutale des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux observée depuis 1850 résulte des activités humaines, entraînant une augmentation du forçage radiatif et le déséquilibre du bilan d'énergie de la Terre. Il est sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, l'océan et les terres, entraînant des changements généralisés et rapide dans toutes les composantes du système climatique. La meilleure estimation de l'influence humaine sur le réchauffement planétaire depuis 1850-1900 est égale au réchauffement observé. Un résultat similaire est obtenu pour le réchauffement observé en France métropolitaine. Les études d'attribution ont été utilisées pour contraindre les projections de réchauffement en France, conduisant à anticiper un réchauffement de l'ordre de 3,8 °C (2,9 à 4,8 °C) d'ici 2100 en métropole pour environ 2,7 °C (2,1 à 3,5 °C) au niveau planétaire, en réponse à un scénario intermédiaire d'émissions mondiales de gaz à effet de serre.

Des méthodes d'attribution rapide des évènements extrêmes ont par ailleurs été opérationnalisées au cours de la dernière décennie pour évaluer en quoi l'influence humaine sur le climat a affecté (ou non) la probabilité d'occurrence et l'intensité d'évènements extrêmes, avec des conclusions robustes pour les évènements de chaleur extrêmes, de pluies extrêmes, plus contrastés pour les sécheresses, selon le contexte, le type de sécheresse et la région considérée.

Les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie jouent un rôle majeur dans l'intensification du changement climatique et ses conséquences. En 2019, l'ensemble des émissions attribuées au secteur industriel représentent 34% de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre. Depuis les années 2000, ses émissions directes ont augmenté plus rapidement que celles de tout autre secteur, tirées par l'accélération de l'extraction et de la production de matériaux de base. La hausse des émissions de l'industrie entre 2010 et 2019 est dominée par les émissions des processus industriels (40%), d'où l'importance des avancées technologiques permettant de décarboner ces processus.

Intervenants

Nathan Gillett
Coordinateur du chapitre « Human influence on the climate system » du rapport du groupe n°1 du GIEC de 2021, chercheur au Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique, et à Environnement et Changement climatique Canada

Sjoukje Philip
Chercheur sur le changement climatique, membre du Royal Dutch Meteorological Institute au Pays-Bas et codirecteur de *World Weather Attribution*

Aurélien Ribes
Auteur contributeur du chapitre 4 « Future global climate » du rapport du groupe n°1 du GIEC de 2021, chercheur au Centre national de recherches météorologiques (UMR Météo France et CNRS) et chercheur associé à l'Institut de mathématiques de Toulouse

Sommaire

Influence humaine sur la composition atmosphérique et forçage radiatif 2

Influence humaine sur le système climatique, méthode et résultats 3

Attribution des évènements extrêmes 4

Influence humaine sur le climat de la France 6

Débats 8

Influence humaine sur la composition atmosphérique et forçage radiatif

Valérie Masson-Delmotte

Paléoclimatologue, directrice de recherche au CEA, coprésidente du groupe n°1 du GIEC de 2015 à 2023, membre du Haut conseil pour le climat et membre de l'Académie des technologies

En ouverture de ce séminaire, je voudrais rendre hommage à Klaus Hasselmann, l'un des pères fondateurs des méthodes d'attribution, dont les travaux ont été récompensés par le Prix Nobel de physique, attribué conjointement en 2021.

L'influence sans équivoque des activités humaines sur la composition atmosphérique

Depuis 1850, on observe une hausse brutale des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4) et d'oxyde nitreux (N_2O). Selon les analyses tirées des archives géologiques, de l'analyse de l'air piégé par la glace polaire ou encore de l'observation directe dans l'atmosphère, le niveau actuel de CO_2 est inédit sur plus de 2 millions d'années. La hausse de sa concentration est dix fois plus rapide que les plus fortes hausses enregistrées au cours des derniers 800 000 ans, et quatre à cinq fois plus qu'au cours des derniers 56 millions d'années. Par rapport à la période préindustrielle, l'atmosphère contient 50 % de plus de CO_2, 150 % de plus de CH_4 et 25 % de plus de N_2O. Au cours de la dernière décennie, ces concentrations ont progressé de façon encore plus rapide qu'auparavant.

Cette évolution résulte, sans équivoque possible, des activités humaines. Cela est démontré, par exemple pour le CO_2, par l'écart entre les concentrations observées au-dessus des régions tropicales ou de l'hémisphère sud, et ceux de l'hémisphère nord, plus industrialisé ; l'évolution du rapport isotopique pour le carbone 14 et le carbone 13 dans le CO_2 atmosphérique, démontrant que celui-ci est issu principalement de processus de photosynthèse anciens ; ou encore l'évolution du rapport O_2/N_2 de l'atmosphère, témoin de l'effet des processus de combustion. Ces constats, établis dès les années 1960, n'ont cessé d'être confirmés et affinés depuis.

Quant aux chlorofluorocarbures (CFC), gaz dont la caractéristique est d'appauvrir la couche d'ozone, le protocole de Montréal de 1985 a entraîné une nette diminution de leurs émissions, mais leurs produits de substitution, les hydrofluorocarbures (HCF), sont de puissants gaz à effet de serre (GES) dont les émissions mondiales ont fortement augmenté et sont maintenant encadrées par le protocole de Kigali depuis 2020.

L'influence sans équivoque des activités humaines sur le forçage radiatif

Le forçage radiatif quantifie les modifications du flux radiatif net depuis le sommet de l'atmosphère par tout facteur externe affectant le système climatique. Les facteurs naturels (activité du Soleil et des volcans) ont un effet négligeable sur l'évolution du forçage radiatif depuis 1750, dont les changements sont dominés par l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre, avec un poids dominant des émissions de CO_2 et de méthane (CH_4), et par les tendances liées aux émissions d'aérosols et leur effet net refroidissant (effet « parasol »). En Europe, en Amérique du nord, et plus récemment en Chine, les politiques publiques d'amélioration de la qualité de l'air et les innovations technologiques permettant de réduire les émissions de composés soufrés ont rapidement entraîné une réduction de la concentration de particules soufrées. Au cours de la dernière décennie, l'effet réchauffant des émissions croissantes de gaz à effet de serre et la perte de l'effet net refroidissant des particules soufrées ont joué dans la même direction, intensifiant le déséquilibre du bilan d'énergie de la Terre.

L'effet prédominant des émissions de CO_2

Chacun des composants de l'atmosphère possède une durée de vie différente. Les particules de pollution sont très rapidement lessivées par les précipitations. Le méthane reste présent une dizaine d'années dans l'atmosphère. Le CO_2 a une durée de vie beaucoup plus longue. Si l'on étudie l'effet, sur cent ans, d'une année d'émissions actuelles, on s'aperçoit que l'effet des émissions de CO_2 est prédominant par rapport à celui des autres émissions. De même, si l'on analyse l'impact d'une année d'émissions de l'industrie sur dix ans, l'effet du CO_2 est contrebalancé par la production de particules de pollution, et l'effet des émissions de méthane est important, mais, sur cent ans, c'est l'effet du CO_2 qui prédomine.

Le rôle de l'industrie dans les émissions

La notion d' « équivalent dioxyde de carbone » (ou « équivalent CO_2 ») est une mesure métrique utilisée pour comparer les émissions de divers gaz à effet de serre sur la base de leur potentiel de réchauffement global (PRG), en convertissant les quantités des divers gaz émis en la quantité équivalente de dioxyde de carbone ayant le même potentiel de réchauffement planétaire. En équivalent CO_2 sur 100 ans, les émissions de gaz à effet de serre sont principalement liées aux émissions de CO_2 provenant des énergies fossiles (64%) ; aux émissions de CO_2 liées à la déforestation et au changement d'usage des terres (11%) ; et enfin aux émissions de méthane (18%), d'oxyde nitreux (4%) et de gaz fluorés (2%).

Lorsque l'on réalloue à chaque secteur les émissions provenant des énergies fossiles utilisées dans ce secteur (électricité et chaleur), le secteur de l'industrie vient en premier (34% des émissions mondiales en 2019).

Quelle que soit la métrique utilisée, depuis les années 2000, les émissions directes de l'industrie ont augmenté plus rapidement que celles de tout autre secteur. Cette évolution est tirée par l'accélération de l'extraction et de la production de matériaux de base. Enfin, entre 2010 et 2019, la hausse des émissions directes et indirectes de l'industrie est dominée par les émissions des processus industriels (40%), d'où l'importance des avancées technologiques permettant de décarboner ces processus.

Influence humaine sur le système climatique, méthode et résultats

Nathan Gillett

Coordinateur du chapitre « Human influence on the climate system » du rapport du groupe n°1 du GIEC de 2021, chercheur au Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique, et à Environnement et Changement climatique Canada

La démarche d'attribution consiste à se demander si le changement observé est explicable par la seule variabilité interne et, dans la négative, si ce changement est cohérent avec la réponse attendue des modèles à ce forçage, et non cohérent avec d'autres explications possibles.

La méthode des régressions optimales

La plupart des études d'attribution s'appuient sur des modèles physiques du système climatique (également utilisés pour les prévisions météorologiques, pour l'atmosphère) qui permettent d'estimer la variabilité interne de ce système et la réponse attendue à un forçage grâce à des méthodes basées sur les régressions optimales. Cette démarche consistant à évaluer la cohérence entre les observations et la réponse simulée a été proposée pour la première fois par Klaus Hasselmann dans un article de 1979.

Par exemple, on peut comparer l'évolution de la température moyenne globale depuis 1850, qui a connu une hausse modérée jusqu'aux années 1960, puis beaucoup plus forte ensuite, aux changements simulés par les modèles climatiques CMIP6 (*Climate Model Intercomparison Project*, phase 6) en réponse aux facteurs humains et naturels conjugués, ou aux facteurs naturels uniquement (notamment l'activité solaire et volcanique). On observe une large coïncidence entre la courbe de l'évolution de la température moyenne et les simulations climatiques en réponse aux facteurs humains et naturels conjugués, et un décrochage très net entre la première courbe et la réponse climatique simulée en réponse aux facteurs naturels uniquement, cette dernière restant assez stable

au fil du temps. La meilleure estimation de l'influence humaine sur la température globale de surface est égale au réchauffement observé.

Les différents indicateurs de l'état du climat planétaire

On peut également utiliser les études d'attribution à propos des différentes indicateurs de l'état du climat planétaire, tels que la hausse de la température moyenne de l'air à la surface du globe, le réchauffement de la troposphère, le refroidissement de la basse stratosphère (dû à l'appauvrissement de la couche d'ozone), les changements à grande échelle des précipitations et de l'humidité dans la haute troposphère, l'expansion de la circulation de Hadley, le réchauffement de l'océan, l'augmentation de sa salinité, l'évolution du niveau de la mer, la perte de glace arctique, la réduction du manteau neigeux, la perte de masse du Groenland, celle de l'Antarctique, le recul des glaciers, l'accroissement de l'amplitude du cycle saisonnier du CO_2 atmosphérique, l'acidification des eaux de surface de l'océan mondial. Dans tous ces domaines, les études d'attribution concluent avec un degré de confiance élevé que les changements observés sont principalement causés par les activités humaines.

Les recherches sur la détection et l'attribution des changements climatiques ont commencé avant qu'une influence anthropique sur le climat ne soit évidente. Depuis lors, les méthodes d'attribution ont été utilisées pour quantifier le réchauffement global dû aux activités humaines et l'influence humaine sur de nombreux aspects du système climatique. En s'appuyant sur ces résultats, le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a conclu sans équivoque que l'activité humaine a causé un réchauffement de l'atmosphère, de l'océan et des terres.

Attribution des évènements extrêmes

Sjoukje Philip

Chercheur sur le changement climatique, membre du Royal Dutch Meteorological Institute au Pays-Bas et codirecteur de World Weather Attribution

Je travaille à l'Institut Météorologique Royal des Pays-Bas et je codirige l'initiative *World Weather Attribution*, qui a démarré en 2015 et dont la mission est de présenter l'état de nos connaissances à un public élargi. Face à des évènements météorologiques extrêmes, nous sommes régulièrement sollicités pour caractériser leur rareté et déterminer s'ils sont dus au dérèglement climatique. Procéder à une évaluation rapide permet de répondre aux questions émergeant de la société mais aussi de donner aux décisionnaires la possibilité d'adapter leurs projets à l'évolution de la situation climatique et de ses impacts.

Le protocole d'attribution rapide

Notre protocole comprend huit étapes. La première consiste à identifier l'évènement extrême à analyser, en se basant sur des critères objectifs, tels que le nombre de victimes ou de personnes déplacées. Nous pouvons intervenir dans différentes parties du monde, à condition de disposer de suffisamment d'observations, d'un modèle climatique, de main d'œuvre et d'experts locaux. Nous décidons alors de lancer ou non l'évaluation.

La deuxième étape porte sur la définition de l'évènement, en nous appuyant sur les experts locaux pour décrire la sévérité de l'évènement (par exemple, des températures au-delà de 38 °C) et de ses impacts, sa portée géographique, l'échelle de temps.

Nous passons alors à l'étape de la détection, basée sur les observations. Prenons le cas d'un évènement de 2018 consistant en une période de trois jours de températures élevées dans une région des Pays-Bas. Nous allons d'abord comparer l'évolution des températures dans cette région par rapport à celle de la température moyenne à la surface globale, puis déterminer quelle est la période de récurrence de cet évènement (par

exemple, 5 ans et demi) en nous basant sur une loi de distribution des valeurs extrêmes. Nous pouvons ensuite comparer le modèle obtenu à ce qui se serait produit dans un climat passé, par exemple en 1900, en estimant le changement d'intensité (par exemple, la température moyenne est maintenant supérieure de 3,4 °C à celle de cette époque) et la probabilité d'occurrence (par exemple, une probabilité d'occurrence maintenant 37 fois plus élevée).

À ce stade, il s'agit encore d'observations. Pour savoir si l'évènement peut ou non être attribué au changement climatique, nous nous appuyons sur les modèles climatiques existants, dans la mesure où nous souhaitons apporter une réponse rapide. Nous commençons par nous assurer de la validité de ces modèles par rapport à l'objectif poursuivi. Par exemple, nous vérifions s'ils représentent correctement le cycle saisonnier de la région considérée. Nous ne poursuivons l'analyse que si au moins deux des modèles disponibles passent le test de validation.

Nous pouvons alors proposer une synthèse en comparant la moyenne des différentes données d'observation et la moyenne des différentes modélisations. Notre conclusion peut être que l'évènement, par exemple une canicule, est en train de devenir de plus en plus probable, ou au contraire qu'il devient de moins en moins probable, comme la plupart des vagues de froid. La synthèse peut aussi ne révéler aucune tendance spécifique, par exemple pour un épisode de vents forts. Dans ce cas, nous déclarons ignorer l'influence du changement climatique sur le phénomène considéré.

Nous nous intéressons également aux questions de vulnérabilité et d'exposition de la population. Par exemple, en Inde, beaucoup d'ouvriers travaillent dehors et sont donc vulnérables à des températures maximales quotidiennes élevées. L'exposition de la population aux catastrophes dépend aussi de la situation politique et de la capacité du pays à réagir à ces dernières.

La dernière étape de notre protocole concerne la communication, qui doit s'adapter à différents publics. Le rapport scientifique est destiné à nos pairs tandis qu'un résumé de ce rapport, publié en ligne, est mis à disposition du public. Nous organisons également des conférences de presse pour les médias.

Quelques exemples

Nous avons sélectionné une région d'Amérique du sud où l'impact d'une vague de chaleur intervenue au printemps a eu des impacts particulièrement sévères. Notre étude a montré que les températures ont été supérieures de 1,4 à 4,3 °C au niveau qu'elles auraient atteint par le passé.

Nous avons montré que la sécheresse extrême qui a sévi cette année en Syrie, en Irak et en Iran était liée au changement climatique (autrefois, ce genre d'épisode ne se produisait que tous les 250 ans). Ce manque d'eau a entrainé des facteurs de stress socio-économiques aggravant d'autant plus les impacts de cette sécheresse.

Des phénomènes tels que la canicule observée au mois de juillet 2023 dans le sud de l'Europe, la température de 40 °C atteinte au Royaume-Uni en 2022 ou la canicule de juillet 2019 en Europe de l'ouest auraient été inconcevables dans le passé. Les inondations de 2021 qui ont provoqué plus de 200 morts en Allemagne, ou les pluies diluviennes en France et en Allemagne, au mois de mai 2016, auraient été moins probables.

Les autres axes de recherche

Pour finir, quelques mots sur notre recherche. Outre la méthode que je vous ai présentée, nous pouvons aussi procéder à des études plus longues et plus élaborées. Par exemple, dans le cadre du projet XAIDA, nous analysons un même évènement en le replaçant dans des climats différents (voir https ://www.climameter.org/about-climameter, qui s'appuie sur la méthode d'analogues de circulation atmosphérique). Nous pouvons aussi étudier des phénomènes composites, comme la survenue d'une canicule et d'une sècheresse simultanées (ce qui intervient également pour les conditions météorologiques propices aux incendies), ou en hiver, des phénomènes extrêmes persistants de froid sans vent.

Influence humaine sur le climat de la France

Aurélien Ribes

Auteur contributeur du chapitre 4 « Future global climate » du rapport du groupe n°1 du GIEC de 2021, chercheur au Centre national de recherches météorologiques (UMR Météo France et CNRS) et chercheur associé à l'Institut de mathématiques de Toulouse

Après avoir évoqué les études d'attribution sur le climat moyen et celles concernant les évènements extrêmes, nous allons aborder les études consacrées spécifiquement à la France métropolitaine, avec quatre questions clés. Le climat de notre pays change-t-il? Quelle part des changements de long terme peut-elle être attribuée aux activités humaines? Qu'en est-il des évènements singuliers? Quelles projections peut-on en tirer pour l'avenir?

Pour répondre à ces questions, on recourt traditionnellement à la comparaison entre des données recueillies par périodes de trente ans, par exemple sur la période de 1900 à 1930 et sur celle de 1990 à 2020. L'une des nouveautés des études d'attribution menées ces dernières années consiste à combiner différentes sources d'information, en particulier les observations, d'une part, et les modèles numériques du climat, d'autre part. Nous pouvons ainsi comparer les observations relevées en France et les modèles climatiques planétaires, en nous appuyant sur les méthodes de statistiques bayésiennes utilisées dans de nombreuses autres disciplines, comme les filtrages de Kalman ou le krigeage.

Des projections revues à la hausse pour la France

Dans une étude de 2022, nous avons ainsi montré que, par rapport à la période de référence 1900-1930, la température moyenne avait augmenté, en France, de 1,7 °C, ce qui est supérieur à la moyenne planétaire. Ce changement n'est devenu perceptible qu'à partir des années 1980, en raison de l'effet masquant des particules de pollution (aérosols), déjà évoqué. À partir de 1980, les émissions de ces particules ont diminué, ce qui a amoindri leur effet refroidissant. Le réchauffement est alors devenu très rapide.

À l'échelle mondiale, plusieurs études ont fourni des projections climatiques combinant des estimations issues des modèles de climat, les observations récentes, et d'autres informations telles que la connaissance des climats passés. La réalisation d'une étude d'attribution du même type pour le réchauffement en France nous a conduits à revoir à la hausse les projections climatiques effectuées par de multiples modèles de climat, en réponse à différents scénarios d'émission de GES. Dans un scénario intermédiaire, où les émissions mondiales de gaz à effet de serre seraient relativement stables au cours des prochaines décennies et diminueraient en fin de siècle (le scénario le plus proche des extrapolations des politiques publiques actuelles), et avec un réchauffement planétaire moyen de l'ordre de 2,7 °C (plage de 2,1 à 3,5 °C), nous estimons que la France connaîtrait en 2100 un réchauffement moyen de 3,8 °C (plage de 2,9 à 4,8 °C), avec un réchauffement plus marqué en été et plus faible en hiver. La récurrence d'années chaudes depuis une vingtaine d'années et, tout particulièrement, la succession de deux années marquées par des records de chaleur, 2022 et 2023, pourrait même conduire à réviser ce scénario un peu plus à la hausse.

Météo France travaille maintenant à la description plus précise de ce à quoi ressemblera le climat de la France à divers niveaux de réchauffement (e.g., +2 °C, +4 °C sur la France métropolitaine), à travers la TRACC (Trajectoire de référence pour l'adaptation au changement climatique).

L'évolution incertaine du régime des précipitations

En ce qui concerne les précipitations moyennes, même en cumulant les données sur toute l'année et à l'échelle de l'ensemble de la France métropolitaine, il n'est pas possible de dégager des tendances robustes, ni dans les observations passées, ni dans les résultats de simulations numériques. Les modèles physiques permettent d'anticiper une hausse des précipitations de 4 à 35% en hiver, et un assèchement de 14 à 52% en été, mais l'évolution de la moyenne annuelle reste incertaine.

La probabilité des canicules

Nous nous intéressons également aux évènements extrêmes, par exemple les canicules. Celles-ci sont définies par Météo France comme des épisodes durant au moins trois jours avec une température moyenne (calculée à partir des températures maximale et minimale d'une journée) supérieure à 28,7 °C. À partir du répertoire de toutes les canicules enregistrées depuis 1947 et caractérisées par leur intensité maximale, leur intensité agrégée sur toute la durée de l'évènement et leur portée géographique, on peut évaluer la façon dont le changement climatique modifie les propriétés statistiques de ces évènements, leur intensité ou leur probabilité d'occurrence. Nous utilisons pour cela des outils de statistiques extrêmes non stationnaires qui nous viennent des mathématiques appliquées, en nous fondant sur une covariable, généralement la température moyenne, et en cherchant à estimer les coefficients inconnus, ce qui nécessite de combiner données modélisées et données observées.

En guise d'illustration, la canicule observée en France en juillet 2019, marquée par des records de température de 42,6 °C à Paris et de 41,5 °C à Dunkerque, avait une probabilité comprise entre 10-3 et 10-4 de se produire au 19e siècle et sur la plus grande partie du 20e siècle. Cette probabilité augmente rapidement ensuite. En 2019, elle était d'une chance sur quarante et, à la fin du 21e siècle, dans un scénario d'émissions fortes, ce type de canicule se produirait quasi systématiquement, chaque été. Entre la période préindustrielle et 2019, nous estimons que la probabilité d'un tel évènement a été multipliée par 600, avec un intervalle de confiance compris entre 20 et l'infini, dans la mesure où il n'est pas certain que de telles températures auraient été possible en l'absence de perturbation liée aux activités humaines. Entre 2015, date de la signature de l'Accord de Paris sur le climat, et 2021, la probabilité d'un tel évènement a augmenté de 80%.

L'évolution des caractéristiques des évènements extrêmes

Parmi les évènements extrêmes figurent également les précipitations supérieures à 150 millimètres d'eau tombée en une journée, telles qu'on peut les observer sur l'arc méditerranéen. La tempête Alex, qui a entraîné des très fortes pluies et des crues dans les vallées de la Roya et de la Vésubie en 2020, en est une illustration. Les analyses récentes montrent que l'on peut identifier une influence humaine significative sur ces épisodes à partir de 200 millimètres par jour. Ces évènements, de même que les tempêtes ou les cyclones tropicaux, font également l'objet de travaux qui ne sont pas destinés à quantifier leur probabilité mais à étudier l'évolution de leurs caractéristiques sous l'influence humaine.

L'attribution désormais incluse dans la caractérisation des évènements extrêmes

Historiquement, une des activités importantes des services météorologiques nationaux est le suivi climatique, qui consiste à décrire et caractériser les évènements extrêmes se produisant à l'échelle nationale. Nous nous efforçons désormais d'inclure dans ces études un volet d'attribution visant à expliquer en quoi les caractéristiques de l'évènement ont été affectées par l'influence humaine. Nous sommes d'ores et déjà en mesure d'établir cette attribution pour les épisodes de températures très élevées ou, au contraire, très basses, et nous essayons de développer notre capacité à le faire pour d'autres évènements particuliers, de façon aussi rapide et opérationnelle que possible.

Ces différents travaux démontrent que l'influence humaine sur le climat de notre pays est déjà majeure et que la quasi-totalité du réchauffement observé en France métropolitaine, comme à l'échelle planétaire, est d'origine anthropique. Notre défi, pour les années à venir, est l'opérationnalisation des études d'attribution aussi bien pour les évènements extrêmes que pour le suivi régulier du climat et du changement climatique.

Débats

Le rôle du méthane

Après le CO_2, le méthane semble être le facteur le plus important de réchauffement. Dispose-t-on d'un historique de ses émissions au fil du temps ?

Valérie Masson-Delmotte : Les carottages arctiques permettent d'évaluer les concentrations atmosphériques de méthane depuis 800 000 ans. Le niveau actuel est 2,5 fois plus élevé que le niveau pré-industriel enregistré lors des périodes interglaciaires des derniers 800 000 ans.

Les particules de pollution

Faudrait-il continuer à émettre des particules de pollution pour nous protéger du réchauffement climatique ?

Valérie Masson-Delmotte : En matière de santé publique, l'idéal serait de réduire à la fois les émissions de particules de pollution et les émissions de méthane, qui sont des précurseurs conduisant à la formation d'ozone en surface (gaz à effet de serre et polluant atmosphérique). Cela permettrait, par la réduction des émissions de méthane, qui a une durée de vie atmosphérique de l'ordre de 12 ans, de contrebalancer la perte de l'effet refroidissant des particules de pollution, de manière à réduire le forçage radiatif des facteurs non CO_2 (positif pour le climat) et à améliorer la qualité de l'air. Pour limiter le réchauffement à un niveau bas, l'enjeu est de réduire les émissions de méthane d'un tiers à l'horizon 2030, et de moitié d'ici 2050. De nombreux pays ont pris des engagements à la COP26 en ce sens.

Quelle proportion d'évènements attribuer à l'activité humaine ?

Quelles sont, en définitive, la proportion des évènements attribués par le *World Weather Attribution* à l'activité humaine et celle des évènements naturels ?

Sjoukje Philip : Les canicules et les vagues de chaleur sont les cas les plus simples car elles sont presque systématiquement liées à l'activité humaine. Parfois, nous pouvons même affirmer qu'elles ne se seraient jamais produites sans le changement climatique. C'est plus compliqué pour les phénomènes de précipitations extrêmes. Il faut étudier chaque évènement ou région séparément et, même ainsi, nous ne pouvons généralement pas attribuer l'évènement de façon certaine au changement climatique.

Le secteur des assurances

Vos travaux seraient certainement très utiles aux compagnies d'assurances. Avez-vous des interactions avec elles ?

Sjoukje Philip : Nous tenons à rester indépendants et, par conséquent, nous n'analysons pas d'évènements pour leur compte. Mais je suppose que les assureurs connaissent nos études et s'en inspirent.

Les émissions des différents secteurs d'activité

Dans les analyses du GIEC, la logistique fait-elle partie du périmètre de l'industrie ?

Valérie Masson-Delmotte : Le transport international et, en particulier, le fret maritime, qui représente environ 2 % des émissions mondiales équivalentes, sont pris en compte dans la catégorie transport.

Les analyses du GIEC ont été établies à partir des secteurs traditionnels de l'économie. Comment les secteurs émergents, tels que le numérique, particulièrement émissif, sont-ils pris en compte ?

Valérie Masson-Delmotte : L'un des groupes de travail du GIEC se charge de réactualiser les inventaires d'émissions. Certains secteurs n'apparaissent pas explicitement, comme celui de la santé, qui est transversal et recouvre des activités industrielles, de la logistique, du bâtiment, ou comme le secteur du tourisme. Le numérique est abordé par le groupe 3 du GIEC, sous deux angles : le rôle du numérique dans les émissions de GES, lié, pour l'essentiel, au renouvellement des matériels ; le potentiel du numérique pour la réduction des émissions, notamment dans l'industrie, grâce aux outils permettant de mieux gérer les stocks ou d'optimiser les processus. Ce secteur représente environ 1 % de la consommation mondiale d'électricité.

Les spécificités de la France

Quelles sont les spécificités de la France en matière de lutte contre le changement climatique ?

Valérie Masson-Delmotte : En France, où l'électricité est beaucoup plus décarbonée que dans le reste du monde, ce sont les transports qui pèsent le plus dans les émissions de CO_2 (30%) puis, à parts égales, les secteurs de l'agriculture, du bâtiment et de l'industrie (20% chacun). Sachant que notre pays s'est fortement désindustrialisé depuis vingt ans, l'empreinte des produits de consommation courante, souvent importés d'Asie ou d'Europe de l'est, se fait de plus en plus lourde (voir le rapport du Haut conseil pour le climat sur l'empreinte carbone de la France). L'enjeu, dans les années qui viennent, est de réindustrialiser la France en tirant parti de notre électricité bas carbone.

Distinguer la pluviométrie au nord et au sud de la France?

Pour réduire le « bruit » dans les données pluviométriques nationales, ne faudrait-il pas distinguer le cas du sud de la France, où les précipitations sont fortement influencées par la proximité de la Méditerranée, de celui du nord du pays ?

Aurélien Ribes : Globalement, on anticipe une intensification des précipitations dans le nord de l'Europe et une diminution, voire un assèchement, dans les régions méditerranéennes. Sachant que la France se situe à cheval sur ces deux zones, on pourrait être tenté d'analyser séparément le cas du nord du pays et celui du sud. Cela dit, chaque fois que l'on se concentre sur une région plus petite, la variabilité naturelle s'accroît et souvent le rapport signal/bruit devient moins favorable. À ce jour, il n'y a pas de tendance observée robuste sur les moitiés nord ou sud de la France.

L'artificialisation des sols

Dans un pays développé comme le nôtre, l'artificialisation des sols joue un rôle important dans le changement climatique. En tenez-vous compte dans les études d'attribution ?

Aurélien Ribes : Tout un pan de la recherche s'intéresse spécifiquement à la question de l'artificialisation des sols et à son influence sur la température locale, particulièrement en ville, où les propriétés radiatives des sols jouent un rôle très important, notamment dans l'apparition d'îlots de chaleur. Néanmoins, nous veillons à ce que les données observées que nous utilisons soient représentatives de l'évolution du climat plutôt que de l'évolution de leur environnement immédiat. C'est pourquoi nos stations de mesure sont implantées dans des zones très contrôlées.

Valérie Masson-Delmotte : Au printemps 2023, on a enregistré jusqu'à 8 °C de différence entre la température dans Paris intramuros et en forêt de Fontainebleau au petit matin…

La robustesse des résultats

Les chiffres que vous avez avancés sont impressionnants, notamment l'estimation de l'augmentation de la température en France à 3,8 °C en 2100. Quelle est la robustesse de cette projection ?

Aurélien Ribes : Les méthodes consistant à combiner modèles et observations sont encore récentes. Le sixième rapport du GIEC, publié en 2021, était le premier à y recourir pour le calcul des projections à l'échelle planétaire. Leur utilisation à une échelle plus fine, comme celle d'un pays, n'a débuté que depuis deux ou trois ans. Néanmoins, ces méthodes s'appuient sur des techniques statistiques mises en œuvre depuis longtemps dans d'autres disciplines et, par ailleurs, nous les évaluons dans le cadre dit du « modèle parfait », ce qui est également de nature à nous rassurer sur leur pertinence.

Selon un article récent de James Hansen, cosigné par une quinzaine d'autres membres de la communauté scientifique, le GIEC se baserait trop sur les modèles et pas assez sur les observations, ce qui le conduirait à sous-estimer considérablement l'augmentation des températures à venir.

Valérie Masson-Delmotte : James Hansen développe un scénario de réchauffement élevé qu'il appuie sur l'hypothèse d'une réaction forte du climat aux aérosols et, par conséquent, d'une plus grande sensibilité climatique, masquée par cet effet. Certaines de ses hypothèses ne sont pas cohérentes avec les contraintes issues des climats passés et intégrées dans l'évaluation du 6e rapport du GIEC. Cet article va probablement susciter de nouvelles études pour tester, confirmer et peut-être réfuter certaines de ses hypothèses.

Ne pas oublier les impacts d'origine non climatique

Depuis deux ou trois ans, lorsqu'il se produit un phénomène climatique extrême, les médias ont tendance à demander de plus en plus souvent à des experts s'il s'agit d'une conséquence du changement climatique et, bien souvent, ceux-ci confirment que tel est bien le cas.

Sjoukje Philip a évoqué le fait que d'autres facteurs pouvaient également intervenir mais, au cours de cette conférence, vous avez surtout insisté sur l'attribution des phénomènes au changement climatique.

Après une période de climato-scepticisme généralisé, ne risque-t-on pas de tout attribuer au changement climatique, alors que des phénomènes comme les inondations peuvent également être liés à la déforestation, à la gestion des sols ou aux prélèvements d'eau ?

La communauté scientifique qui s'intéresse au climat ne devrait-elle pas mettre également en avant ces facteurs d'explication ?

Sjoukje Philip : Vous avez raison. Il faut absolument prendre en compte les autres facteurs. Au terme de l'une de nos études, par exemple, nous avons conclu que, dans le phénomène de manque d'eau que nous avions analysé sur un territoire donné, le changement climatique ne jouait qu'un rôle mineur. Le problème venait davantage de l'accroissement de la population et de l'augmentation de la consommation d'eau que d'un épisode de sècheresse.

L'extension de l'étude française à d'autres pays européens

Des études comparables à celle menée par Aurélien Ribes ont-elles été réalisées dans d'autres pays européens ?

Aurélien Ribes : Lors de la rédaction de l'article, nous nous sommes demandé si nous devions nous concentrer sur la France ou étendre nos analyses à l'Europe de l'Ouest, par exemple. Ce fut un choix difficile. Nous avons opté pour le fait de nous concentrer sur la France mais nous allons probablement réitérer cette même étude pour d'autres pays, voire pour toute l'Europe de l'Ouest, car elle a reçu beaucoup d'attention au niveau international.

Certains de nos collègues de la Communauté européenne nous disent en effet qu'ils se posent les mêmes questions que nous à propos de simulations précédentes, dans lesquelles les températures simulées augmentent à un rythme inférieur à celui des températures observées.

La disparition de la glace arctique

Valérie Masson-Delmotte : Nathan Gillett, vous avez récemment publié une étude sur la disparition de glace de l'Océan Arctique, dans laquelle, comme Aurélien Ribes, vous combinez les modèles et les observations, ce qui vous conduit à réviser les projections existantes. Pouvez-vous nous en dire un mot ?

Nathan Gillett : Il s'agit d'une étude menée par des collaborateurs coréens qui ont comparé la réduction observée de l'extension de glace de mer aux simulations climatiques. En moyenne, les modèles sous-estiment le taux de réduction par rapport aux observations. On peut en déduire que l'Arctique va probablement se retrouver dépourvu de glace encore plus tôt que le GIEC ne le prévoit.

Ressources :

- Rapport du groupe I du GIEC de 2021 : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/. Voir notamment les chapitres 1 (*Cross-Working Group Box, Attribution*), 2 (*Changing state of the climate system*), 3 (*Human influence on the climate system*), 5 (*Global carbon cycle*), 7 (*Earth's energy budget*) et 11 (*Weather and climate extreme events in a changing climate*).

- Réactualisation d'indicateurs clés de l'état du climat jusqu'à fin 2022 : Forster et al, ESD, 2023 https://essd.copernicus.org/articles/15/2295/2023/essd-15-2295-2023.html

- Rapport du groupe III du GIEC de 2022 : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/. Voir notamment le chapitre 2 (*Emission trends and drivers*) et les chapitres sectoriels dont le 11 (*Industry*)

- Attribution rapide d'évènements extrêmes à fort impact : https://www.worldweatherattribution.org/analyses/

- Évaluation du réchauffement passé et futur en France, contrainte par les observations : Ribes et al, ESD, 2023 https://esd.copernicus.org/articles/13/1397/2022/esd-13-1397-2022.html

Mots-clés : attribution, canicule, forçage radiatif, gaz à effet de serre, GIEC, réchauffement climatique

Citation : Valérie Masson-Delmotte, Nathan Gillett, Sjoukje Philip & Aurélien Ribes. (2023). *Attribution du changement climatique à l'activité humaine*. Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr
Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Patrick Pélata. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Élisabeth Bourguinat. n° ISSN : 2826-6196.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.