LNG en mode *Aeolus* (en visée dépointée à 37° du nadir) ;

- la faisabilité du concept des observations de la mission Wivern sélectionnée pour une phase 0 dans le cadre de Earth-Explorer 11 pour la cartographie des vents, précipitations et propriétés des nuages à l'échelle globale, grâce aux observations du radar Rasta ;

- la préparation des algorithmes de la mission radar-lidar EarthCare grâce aux données synergétiques du radar Rasta et du lidar LNG (Rali) ainsi que des sondes microphysiques, obtenues lors des vols faits sur des cellules convectives dans l'environnement des dépressions et tempêtes tropicales.

La tempête tropicale *Rose*

La tempête tropicale *Rose* s'est formée sur l'Atlantique Nord tropical le 19 septembre après-midi, devenant la 17^e tempête nommée de la saison 2021 des ouragans dans l'Atlantique. *Rose* était située à environ 300 miles nautiques au sud-ouest des îles du Cap-Vert peu avant 17 h TU le 19 septembre. Le Falcon 20 a échantillonné l'environnement dans lequel *Rose* s'est développée au cours de vols réalisés le 18 septembre après-midi (figure 3) et le 19 septembre au matin. Le 18 septembre après-midi, le Falcon 20 a volé en amont et dans une perturbation tropicale qui allait devenir la tempête tropicale *Rose* deux jours plus tard. Au cours de ce vol, des observations ont pu être acquises dans une région caractérisée par une forte humidité (figure 3d) et une forte nébulosité (figure 3a, c), au plus près du centre de la perturbation (figure 3d) autour de laquelle s'enroulait un panache d'aérosols terrigènes

(figure 3b). L'intérêt de combiner des observations de télédétection radar et lidar est illustré sur la figure 4 lors du vol 12 du 18 septembre. Les données acquises par Rali permettent de détailler conjointement la répartition verticale à haute résolution spatio-temporelle des couches d'aérosols, et des nuages (nuages de couche limite, nuages moyens et les cirrus), afin de mieux appréhender leurs interactions.

Les mesures aéroportées acquises pendant la campagne ont permis de documenter les situations espérées, notamment en ce qui concerne l'environnement dynamique, en aérosols et nuageux de perturbations tropicales. Elles ouvrent de vraies perspectives pour répondre aux objectifs scientifiques de Caddiwa en termes de compréhension du rôle des interactions nuages-dynamique atmosphérique-aérosols terrigènes pour le développement des tempêtes tropicales au large du Cap-Vert. Elles permettront également de mieux contraindre les simulations qui seront réalisées à l'aide des modèles régionaux, notamment pour appréhender l'impact des différents effets radiatifs des aérosols, ainsi que de valider, améliorer et préparer, dans le cadre de scènes tropicales particulièrement complexes, différents produits satellitaires afférents à des missions d'importance pour les agences spatiales européennes.

Partenaires

Partenaires français : CNRS, Cnes, Météo-France, UCA, IPGP/IGN et Ensta-Bretagne.

Partenaires étrangers : ESA, Université du Cap-Vert à Praia et INMG au Cap-Vert, DLR, KIT et Tropos en

Allemagne, NOA en Grèce, Université de Nova Gorica en Slovénie, Scuola Universitaria Superiore IUSS de Pavie en Italie.

Laboratoires français impliqués : Laboratoire atmosphère milieux observations spatiales (Latmos/IPSL, Île-de-France), Laboratoire de météorologie dynamique (LMD/IPSL, Île-de-France), Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques (Lisa/IPSL, Île-de-France), Laboratoire d'aérodynamique (Laero/OMP, Toulouse), Laboratoire de météorologie physique (Lamp/OPGC, Clermont-Ferrand), Institut des géosciences de l'environnement (IGE/Osug, Grenoble), Laboratoire d'océanologie et de géosciences (LOG, Wimereux), Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement (Safire, CNRS/Météo-France/Cnes, Toulouse), Division technique de l'Insu (DT-Insu, Meudon), Institut de physique du globe de Paris (IPGP, Paris).

La campagne est soutenue financièrement par l'Agence spatiale européenne (ESA), le Cnes, le CNRS-Insu (programme Lefe) et l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL).

Cyrille Flamant, Julien Delanoë

Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales, IPSL

Jean-Pierre Chaboureau

Laboratoire d'aérodynamique

Christophe Lavaysse

Institut des géosciences de l'environnement

Marco Gaetani

Scuola universitaria superiore IUSS de Pavie

Olivier Bock

Institut de physique du globe de Paris

Pour en savoir plus :

Site de la campagne : <https://www.aeolus.esa.int/confluence/display/TC2/>

Lamorte C., Borbon A., Schwarzenboeck A., Canonici J.-C., 2016. Safire : des avions au service de la recherche en environnement. *La Météorologie*, 93, 30-41.

Ce qu'il faut retenir du dernier rapport du 1^{er} groupe de travail du Giec

Après un mois de juillet 2021 qui a vu l'Agence internationale de l'énergie nous alerter sur la hausse continue des émissions de gaz à effet de serre, l'Amérique du Nord confrontée à des méga-feux liés à une vague de chaleur inédite, l'Allemagne et la Chine

soumises à des pluies diluviennes battant des records historiques, le premier groupe de travail du Giec (WG1, 234 auteurs issus de 65 pays) a publié le 9 août dernier son sixième rapport (AR6) sur les bases physiques du changement climatique. Les principales

conclusions ont été recensées dans un résumé à l'intention des décideurs approuvé par les représentants des gouvernements à l'occasion de la 54^e assemblée du Giec qui, en raison de la crise sanitaire internationale, s'est déroulée en ligne sur deux semaines

consécutives (186 heures de sessions zoom menées « tambour battant »). Cette session d'approbation fut le point final d'un long processus de maturation démarré en 2018, basé sur l'évaluation de plus de 14 000 articles scientifiques, qui a vu la production de deux « brouillons » successifs nécessitant de répondre à plus de 78 000 commentaires de près de 2 000 experts.

Quels enseignements peut-on tirer de ce nouveau rapport, alors que le Giec ne cesse de répéter depuis sa création en 1988 que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont responsables du réchauffement global observé depuis le début de l'ère industrielle ? Qu'en l'absence de réductions immédiates, drastiques et prolongées des émissions, ce réchauffement s'amplifiera et s'accompagnera de perturbations de l'ensemble du système climatique et d'impacts potentiellement dévastateurs pour les écosystèmes et les populations humaines ?

Si la plupart des connaissances accumulées depuis la création du Giec étaient déjà très robustes, quelques nouveautés sont toutefois à noter. Elles concernent notamment l'attribution des changements climatiques observés, l'utilisation d'observations pour contraindre (c'est-à-dire corriger) les projections de température et d'élévation du niveau de la mer, ainsi qu'une attention accrue portée au cycle de l'eau, aux changements régionaux (apparition d'un atlas en ligne, <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>), aux événements extrêmes et aux trajectoires climatiques jugés *a priori* peu probables, mais néanmoins physiquement plausibles et que l'on ne peut ignorer en raison de leurs forts impacts potentiels.

L'origine anthropique du réchauffement est sans équivoque

Depuis le précédent rapport publié en 2013, les concentrations observées des principaux gaz à effet de serre ont continué à augmenter dans l'atmosphère, atteignant en 2019 des moyennes annuelles de 410 ppm pour le dioxyde de carbone (CO_2), 1866 ppb pour le méthane (CH_4) et 332 ppb pour le protoxyde d'azote (N_2O), ce qui représente un accroissement de 47 %, 156 % et 23 % respectivement pour ces trois gaz par rapport à leur niveau du début de la révolution industrielle, et un niveau jamais atteint

depuis au moins deux millions d'années pour le CO_2 . Selon les experts du Giec, la hausse observée de la température moyenne globale de l'air en surface d'environ 1,1 °C (ou 1,6 °C en moyenne sur les continents) peut entièrement s'expliquer par l'influence des activités humaines sur le climat. La réponse conjointe aux variations naturelles de l'activité solaire et aux éruptions volcaniques est en effet estimée à $\pm 0,1$ °C entre les périodes 1850-1900 et 2010-2019, tandis que la réponse aux activités humaines (principalement les émissions de gaz à effet de serre) est comprise entre 0,8 et 1,3 °C. L'origine anthropique du réchauffement observé est aujourd'hui un fait établi, et de nombreuses études formelles dites « d'attribution » démontrent d'ores et déjà l'influence humaine sur les cycles de l'eau et du carbone, l'acidité des océans et le niveau de la mer, le retrait de la banquise Arctique, de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord et de la plupart des glaciers, mais aussi l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des canicules, des fortes précipitations et des sécheresses dans de nombreuses régions du globe, ou de la proportion des cyclones tropicaux les plus violents (catégories 3 à 5).

Ce qui peut se résumer de la manière suivante : les changements climatiques récents sont sans précédent dans l'histoire de l'humanité. Essentiellement liés à notre « empreinte carbone », ils sont généralisés, rapides et se sont encore intensifiés au cours des dernières décennies. Par exemple, la hausse du niveau moyen de la mer était estimée à $2,0 \pm 0,3$ mm/an de 1971 à 2010 dans l'AR5 ; elle est évaluée à $3,7 \pm 0,5$ mm/an sur la période 2006-2018 par l'AR6, avec une contribution croissante de la fonte des calottes glaciaires à cette élévation.

Chaque année compte pour limiter le réchauffement global à +1,5 °C

Dans la continuité du rapport spécial SR1.5 publié en 2018, mais en réévaluant l'ensemble des termes aboutissant à la bijection qui existe entre les émissions cumulées de dioxyde de carbone et le réchauffement global par rapport à la période 1850-1900, l'AR6 WG1 réaffirme le caractère quasi linéaire de cette relation qui signifie qu'il faudra arriver à « zéro émission

Figure 1. Émissions anthropiques cumulées de CO_2 absorbées par les puits terrestres et océaniques d'ici 2100 dans le cadre de cinq scénarios illustratifs (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5). Les puits de carbone terrestres et océaniques réagissent aux émissions passées, actuelles et futures, c'est pourquoi les puits cumulés de 1850 à 2100 sont présentés ici. Au cours de la période historique (1850-2019), les puits terrestres et océaniques observés ont absorbé 1 430 GtCO_2 (59 % des émissions). Le diagramme à barres illustre la quantité projetée d'émissions anthropiques cumulées de CO_2 (GtCO_2) entre 1850 et 2100, restant dans l'atmosphère (partie grise) et absorbée par les terres et les océans (partie colorée) en 2100. Le graphique en forme de beignet illustre la proportion des émissions anthropiques cumulées de CO_2 absorbées par les puits terrestres et océaniques et restant dans l'atmosphère en 2100. Les valeurs en pourcentages indiquent la proportion des émissions anthropiques cumulées de CO_2 absorbées par les puits terrestres et océaniques combinés en 2100. Source : AR6 WG1, figure SPM.7.

nette » de CO₂ pour parvenir à stabiliser la température du globe. En d'autres termes, il s'agira donc de compenser nos émissions résiduelles par la mise en œuvre à grande échelle de techniques de capture et de séquestration du CO₂ atmosphérique (CDR, *carbon dioxide removal*), notamment en exacerbant les puits naturels de carbone océaniques et continentaux.

Pour autant, le Giec souligne que ces puits seront moins efficaces dans un climat plus chaud (figure 1), bien qu'ils aient continué d'absorber plus de la moitié de nos émissions au cours des six dernières décennies. Il s'agira donc de stimuler artificiellement ces puits, par exemple en restaurant ou en plantant des forêts, en augmentant le taux de matière organique dans les sols, ou en développant des bioénergies avec captage et stockage des émissions de CO₂. Au rythme actuel des émissions, et si rien n'est fait par ailleurs pour limiter leur impact sur les concentrations (méthodes CDR) ou la température (méthodes SRM, *solar radiation modification*, qui consistent à compenser en partie le renforcement de l'effet de serre par une diminution du rayonnement solaire incident en surface voire au sommet de l'atmosphère), il ne nous reste plus qu'une dizaine d'années avant d'avoir deux chances sur trois d'atteindre un réchauffement global de +1,5 °C ; moins de dix ans si l'on tient également compte de nos émissions d'autres gaz à effet de serre (en premier lieu le méthane) ou si l'on analyse une année particulière et que l'on considère la variabilité interne du climat (mais l'Accord de Paris porte exclusivement sur la réponse aux forçages anthropiques).

Sur la base du scénario envisagé le plus favorable (SSP1-1.9), la température moyenne à la surface du globe entre 2081 et 2100 sera très probablement supérieure de 1,0 à 1,8 °C par rapport au niveau préindustriel, ici estimé de 1850 à 1900. Un réchauffement global de 1,5 °C serait à coup sûr dépassé au cours du XXI^e siècle dans le cadre des scénarios intermédiaire, élevé et très élevé considérés par le Giec (SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5). Même dans le scénario SSP1-1.9, il est plus probable qu'improbable que la température de surface de la Terre redescende en dessous de 1,5 °C vers la fin du siècle, avec un dépassement temporaire de ce seuil de 0,1 °C en milieu de siècle. Certains changements seront irréversibles pendant des siècles, voire quelques millénaires, et ceci quel que soit le scénario envisagé. C'est le cas

pour le réchauffement, l'acidification et la désoxygénation de l'océan profond, la fonte des calottes polaires et la hausse du niveau de la mer.

Certains changements pourraient être ralentis et d'autres stoppés

Le premier groupe de travail du Giec insiste sur le fait qu'il nous reste d'importantes marges de manœuvre pour limiter l'amplitude des changements dans les océans et la cryosphère. D'ici à 2100, l'élévation du niveau moyen de la mer pourrait par exemple atteindre de 0,63 à 1,01 mètre dans le scénario à très fortes émissions, mais seulement de 0,28 à 0,55 mètre dans le cas d'une importante réduction des émissions. Les experts du Giec notent par ailleurs que de nombreux changements *a priori* peu probables, tels que des changements brusques de la circulation océanique ou une déstabilisation des calottes polaires, ne peuvent pas être exclus et font partie de l'évaluation des risques liés au changement climatique. La probabilité de tels événements augmente avec le niveau du réchauffement planétaire. Dans un scénario sans réduction des émissions de gaz à effet de serre, une augmentation du niveau moyen de la mer de l'ordre de 5 mètres ne peut ainsi être exclue dès 2150.

De nombreux autres changements pourraient être stoppés rapidement en cas de forte réduction des émissions. Le Giec estime ainsi que le réchauffement additionnel dépend essentiellement de nos émissions futures, puisqu'un arrêt instantané des émissions conduirait à une stabilisation rapide de la température malgré le déséquilibre radiatif résiduel

au sommet de l'atmosphère (en raison des rétroactions liées au cycle du carbone). En revanche, et conformément aux conclusions du rapport spécial SR1.5, chaque tonne de CO₂ et chaque demi-degré de réchauffement additionnel s'accompagnent d'un accroissement du dérèglement climatique, qu'il s'agisse des perturbations du cycle de l'eau ou de l'accroissement de la fréquence et de l'intensité de nombreux événements extrêmes. Par exemple, le Giec estime avec une confiance élevée que les précipitations quotidiennes extrêmes devraient s'intensifier d'environ 7 % pour chaque degré de réchauffement à l'échelle mondiale, même si des variations régionales apparaissent en raison de changements de circulation atmosphérique pouvant moduler la fréquence des événements fortement précipitants.

On notera au passage qu'une avancée majeure de l'AR6 a été d'évaluer les projections de température et d'élévation du niveau de la mer, non pas sur la base des sorties brutes des modèles de climat, mais en les combinant à d'autres informations provenant notamment d'archives paléoclimatiques et d'observations sur la période historique. Ces contraintes observationnelles n'ont malheureusement pas pu être appliquées à d'autres variables, telles que celles relatives aux cycles de l'eau et du carbone, en raison de la moindre fiabilité des observations et/ou de la plus forte variabilité naturelle de ces paramètres. Le chapitre 8 du rapport estime par ailleurs que les changements régionaux du cycle de l'eau ne sont pas nécessairement liés de manière linéaire au réchauffement global et qu'ils se traduiront aussi par une plus grande variabilité à l'échelle intrasaisonnière comme à l'échelle interannuelle.

Figure 2. Estimations des émissions historiques de CO₂ et des budgets de carbone restant. Les budgets de carbone restant estimés sont calculés à partir du début de l'année 2020 et s'étendent jusqu'à ce que les émissions mondiales nettes de CO₂ soient nulles. Dans cette figure, le réchauffement climatique est relatif à la période 1850-1900 et fait référence à l'augmentation de la température de surface de la planète due à l'activité humaine, ce qui exclut l'impact de la variabilité naturelle sur les températures mondiales d'une année à l'autre. Source : AR6 WG1, tableau SPM.2.

En conclusion

Diminuer les émissions de gaz à effet de serre reste la condition *sine qua non* pour limiter le réchauffement global. Depuis 1750, un total de plus de 2 500 milliards de tonnes de CO₂ (2 500 GtCO₂) a déjà été émis. Les émissions cumulées de carbone compatibles avec les cibles de réchauffement envisagées dans l'Accord de Paris restent proches de celles estimées dans le rapport spécial SR1.5 (figure 2). Atteindre de tels objectifs représente un défi technique et civilisationnel d'autant plus important que la capacité des océans et des continents à piéger une fraction importante de nos émissions de CO₂ diminuera au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle si nous n'agissons pas dès

maintenant pour limiter les émissions de CO₂. Il est également urgent de limiter les émissions de méthane, ce qui s'accompagnera d'une amélioration de la qualité de l'air et permettra de limiter le réchauffement qui résulterait d'une réduction de la pollution atmosphérique (souhaitable sur le plan sanitaire).

De tels efforts d'atténuation des émissions sont-ils encore possibles en temps voulu ? Ce n'est évidemment pas au premier groupe de travail du Giec de se prononcer à ce sujet. Mais force est de reconnaître qu'il ne suffit pas de décréter que c'est « physiquement et chimiquement possible » pour que cela se réalise. Ce n'est plus le scientifique, mais le citoyen *lambda* qui s'exprime ici : l'acceptabilité sociétale

des mesures d'atténuation ne doit pas attendre que les politiques d'adaptation aux changements climatiques montrent leurs limites. Il s'agit donc pour le Giec d'informer au mieux les décideurs et l'ensemble des citoyens, afin de contribuer à une prise de conscience globale que le changement climatique n'est ni la fin du monde ni celle de l'humanité, mais bien la fin d'un monde où la consommation d'énergie était sans limite, les « biens communs » sans valeur économique et la préservation de l'environnement souvent confinée à quelques parcs nationaux et aires maritimes soi-disant protégées.

Hervé Douville

Auteur coordonnateur du chapitre 8,
CNRM, Météo-France

« Destination 2030 » : innovation et impact à Eumetsat

Cet été dans l'hémisphère Nord a donné un aperçu sinistre de l'impact sur nos sociétés des phénomènes météorologiques extrêmes. Inondations, incendies et records de chaleur ont entraîné la mort de centaines de personnes, détruit des infrastructures et anéanti des activités économiques.

Dans le cadre de leur mission essentielle de protection des populations, les services météorologiques du monde entier sont confrontés à un défi de plus en plus urgent : transmettre au plus vite des informations précises sur les phénomènes météorologiques violents. La fréquence croissante de ces phénomènes découlant très probablement du changement climatique ne fait qu'ajouter à ce défi.

Eumetsat, l'agence européenne de satellites météorologiques, vient de publier une nouvelle stratégie à long terme baptisée « Destination 2030 », qui vise précisément à apporter une réponse à ce défi (figure 1). Eumetsat prévoit de réaliser des progrès considérables au cours de la prochaine décennie en mettant en service des systèmes et des instruments satellitaires plus sophistiqués, en recourant à l'innovation dans des domaines tels que l'intelligence artificielle et l'apprentissage machine et en explorant les possibilités qu'offre le secteur du *New Space*¹.

« Le tout premier objectif de cette stratégie, et le plus important, est de réussir le déploiement de systèmes

Figure 1. Couverture de la brochure « Destination 2030 » d'Eumetsat, accessible à l'adresse <https://www.eumetsat.int/challenge-protecting-against-extreme-weather-shapes-new-eumetsat-strategy>

satellitaires de nouvelle génération sur des orbites géostationnaires et polaires», indique Phil Evans, directeur général d'Eumetsat. « Notre système actuel en orbite polaire est déjà celui qui contribue le plus à la précision des prévisions météorologiques sur l'Europe à des échéances comprises entre 12 heures et 10 jours (voir par exemple Joo *et al.*, 2013). Dans le même temps, notre système *Meteosat* en orbite géostationnaire se révèle essentiel à la prévision immédiate d'événements

météorologiques à évolution rapide comme les fortes tempêtes. »

Les systèmes de nouvelle génération permettront d'atteindre un tout autre palier, en s'appuyant sur des instruments nouveaux et plus perfectionnés qui fourniront plus rapidement des volumes de données plus importants et de meilleure qualité.

« Pour ne citer qu'un exemple, les instruments à bord de nos satellites géostationnaires *Meteosat Troisième Génération (MTG)* permettront, pour la première fois, de suivre le cycle de vie complet des orages. Ils détecteront l'instabilité initiale de l'atmosphère avant même que ne se forment des nuages, effectueront des observations plus rapides et à plus haute résolution de l'évolution et de la trajectoire des orages, et observeront les éclairs. Ce système va littéralement sauver des vies. »

Le lancement du premier satellite *MTG* (figure 2) est prévu pour la fin 2022 et celui du premier satellite du Système polaire de seconde génération d'Eumetsat (*EPS-SG*), en orbite basse, à la fin 2023. « D'ici 2030, Eumetsat aura renouvelé ses flottes sur les deux types d'orbites », ajoute Phil Evans.

1. Industrie spatiale émergente d'initiative privée, en particulier les nouvelles compagnies aérospatiales travaillant au développement d'un accès à bas coût et public à l'exploration de l'espace et aux technologies d'observation de la Terre.