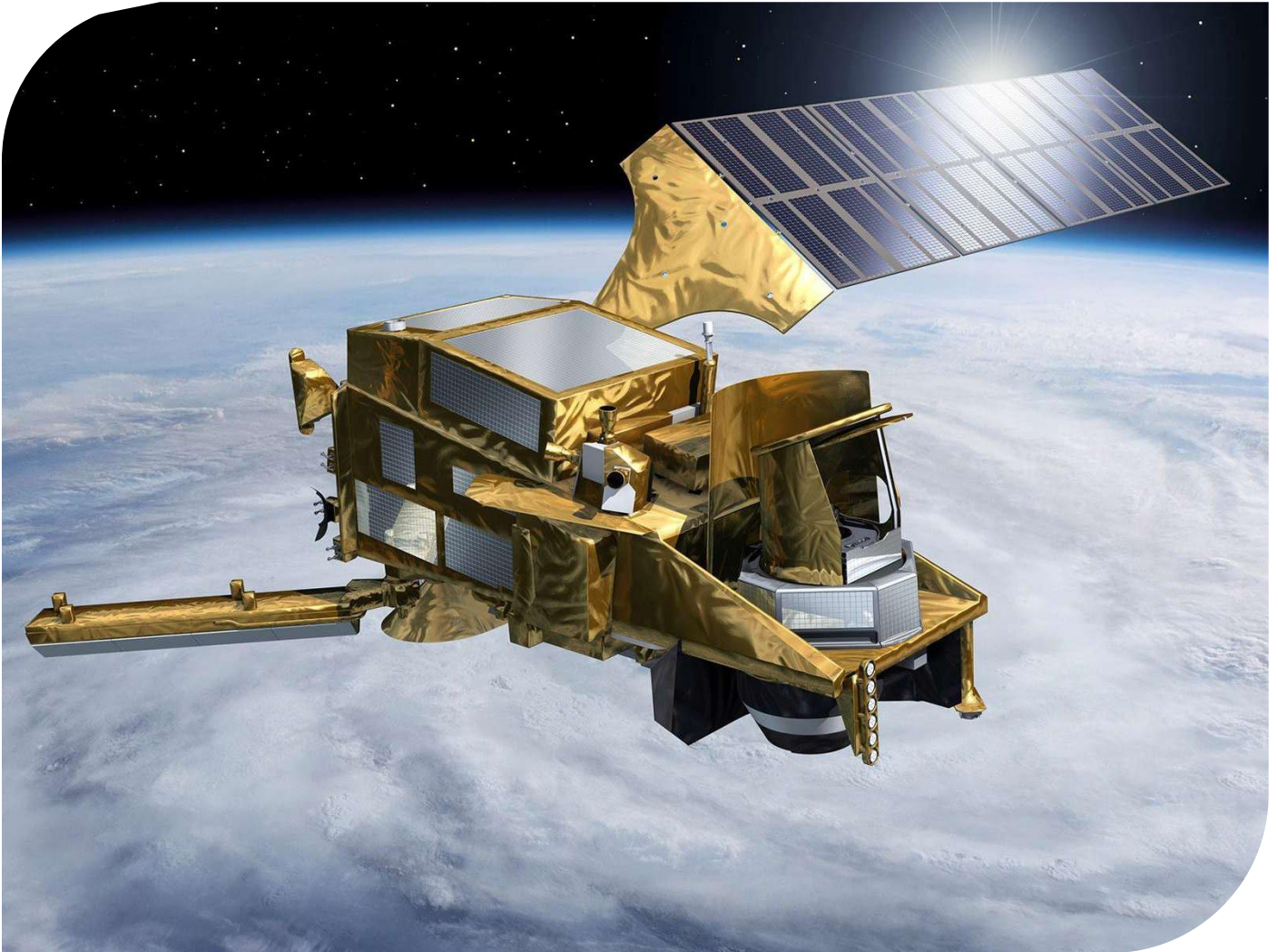


# Changement climatique, esprit critique et données spatiales



Sabrina Ben Brahim – Yves Darbarie – Natacha Mazon

Cahier support

# TABLE DES MATIERES

<b>PARTIE 1 : QUELQUES DONNEES SCIENTIFIQUES</b>	<b>3</b>
<b>1. Changement climatique, Fonte des Glaces et montée du niveau de la mer</b>	<b>3</b>
1.1 Perte de masse des calottes glaciaires et des glaciers	3
1.2 Réduction de l'étendue et de l'épaisseur de la banquise	6
1.3 Changement climatique et élévation du niveau marin	8
<b>2. Changement climatique et Phénomènes météorologiques paroxystiques : l'exemple des cyclones</b>	<b>13</b>
2.1 Rappel sur la circulation atmosphérique, les anticyclones, les dépressions et les tempêtes	13
2.1.1 Vents et pression atmosphérique	13
2.1.2 Les différents types de tempêtes	15
2.1.3 Conditions d'apparition d'une tempête	17
2.1.4 Le cas des cyclones	18
2.2 Changement climatique et activité cyclonique	20
2.2.1 Une difficile approche statistique	20
2.2.2 Cyclone et variabilité interne du climat	21
2.2.3 Des conséquences possibles du changement climatique sur l'activité cyclonique	26
2.2.4 des mécanismes possibles du changement climatique sur l'activité cyclonique	28
2.3 2020 : Une année cyclonique exceptionnelle	31
<b>PARTIE 2 : L'APPORT DU SPATIAL</b>	<b>35</b>
<b>1. Etudier La cryosphere depuis l'Espace</b>	<b>35</b>
<b>2. Mesurer la température des océans</b>	<b>39</b>
<b>3. Mesurer la vitesse des vents depuis l'Espace</b>	<b>41</b>
<b>PARTIE 3 : ACTIVITES PEDAGOGIQUES</b>	<b>46</b>
<b>1. Changement climatique et Esprit critique</b>	<b>46</b>
1.1 Proposition d'une séquence autour du réchauffement climatique à travers le prisme de l'esprit critique (cycle 4)	46
1.2 Regards croisés : apports du spatial et de l'esprit critique pour traiter spécifiquement la thématique de la montée du niveau des eaux	47
<b>2. Cyclones et rechauffement climatique</b>	<b>71</b>
2.1. Partie 1 : Expérience de modélisation d'un phénomène cyclonique	71
2.1. Partie 1 : Faire émerger une problématique sur le changement climatique	73
2.2. Partie 2 : Analyse critique : Relier l'activité cyclonique et le réchauffement climatique : l'exemple Katrina	75
2.3. Partie 2 : Analyse critique : Relier une année cyclonique exceptionnelle et le changement climatique	83
2.4. Partie 3 : L'apport du spatial	96
2.4.1 Observer les cyclones	97
2.4.1.1 Informations générales	97
2.4.1.2 exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota	99
2.4.2 Température de surface des océans des zones de formation	113
2.4.2.1 Informations générales	114
2.4.2.2 Exemple d'utilisation de données : Températures de surface et formation d'un cyclone	115
2.4.3 Evaluer la vitesse du vent	121
2.4.4 Quantifier les précipitations associées	121
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b>	<b>123</b>

# PARTIE 1 : QUELQUES DONNEES SCIENTIFIQUES

Le changement climatique se traduit par des impacts sur le fonctionnement des différentes enveloppes terrestres ou les interactions entre elles. On se propose d'illustrer pour chacune de ces enveloppes quelques exemples de ces impacts et de discuter sur leur évolution possible au regard des résultats des modélisations climatiques

Scénario	Court terme : 2031–2050		Fin du siècle : 2081–2100	
	Moyenne (°C)	Fourchette probable (°C)	Moyenne (°C)	Fourchette probable (°C)
RCP2.6	1,6	1,1 à 2,0	1,6	0,9 à 2,4
RCP4.5	1,7	1,3 à 2,2	2,5	1,7 à 3,3
RCP6.0	1,6	1,2 à 2,0	2,9	2,0 à 3,8
RCP8.5	2,0	1,5 à 2,4	4,3	3,2 à 5,4

Figure 1 : Évolution projetée de la température moyenne à la surface du globe, par rapport à 1850–1900, pour deux périodes avec quatre

L'évaluation des changements futurs s'appuie en grande partie sur les projections des modèles climatiques du programme CMIP5 utilisant les trajectoires représentatives de concentration (RCP). Les scénarios RCP comprennent des séries chronologiques d'émissions et de concentrations de l'ensemble des gaz à effet de serre, aérosols et gaz chimiquement actifs, ainsi que d'évolution de l'usage des terres et du couvert végétal. Chaque RCP représente l'un des multiples scénarios possibles conduisant à différents niveaux de réchauffement planétaire. La trajectoire RCP2.6 illustre un avenir marqué par de faibles émissions de gaz à effet de serre du fait d'efforts importants d'atténuation du changement climatique, qui se traduit dans les simulations CMIP5 par deux chances sur trois de contenir le réchauffement planétaire sous 2°C d'ici à 2100. En revanche, le scénario RCP8.5 est un scénario d'émissions fortes de gaz à effet de serre en l'absence de politiques destinées à lutter contre le changement climatique, conduisant à une augmentation continue et soutenue des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre. Parmi tous les RCP, le RCP8.5 correspond à la trajectoire d'émissions les plus élevées de gaz à effet de serre. Le tableau fournit les estimations du réchauffement total depuis la période préindustrielle correspondant à quatre RCP différents pour les périodes principales utilisées pour l'évaluation des évolutions futures dans ce rapport. Le réchauffement observé entre 1850–1900 et 1986–2005 est estimé à 0,63°C d'après les observations de la température de l'air à la surface de l'océan et des terres émergées. Les changements futurs modélisés de la température moyenne de l'air à la surface du globe par rapport à 1986–2005 sont ajoutés à ce réchauffement observé.

## 1. CHANGEMENT CLIMATIQUE, FONTE DES GLACES ET MONTEE DU NIVEAU DE LA MER

### 1.1 Perte de masse des calottes glaciaires et des glaciers

La masse des calottes glaciaires et des glaciers a diminué dans le monde entier. Entre 2006 et 2015, la calotte glaciaire du Groenland a perdu 278 Gt de masse par an en moyenne essentiellement sous l'effet de la fonte en surface. Dans le même temps la perte moyenne de masse de la calotte glaciaire de l'Antarctique s'est établie à 155Gt, causée surtout par l'amincissement et le recul rapides des grands glaciers qui drainent la calotte de l'Antarctique de l'Ouest. Les glaciers situés ailleurs qu'au Groenland et en Antarctique quant à eux ont perdu de la masse à un rythme moyen de 220 Gt par an

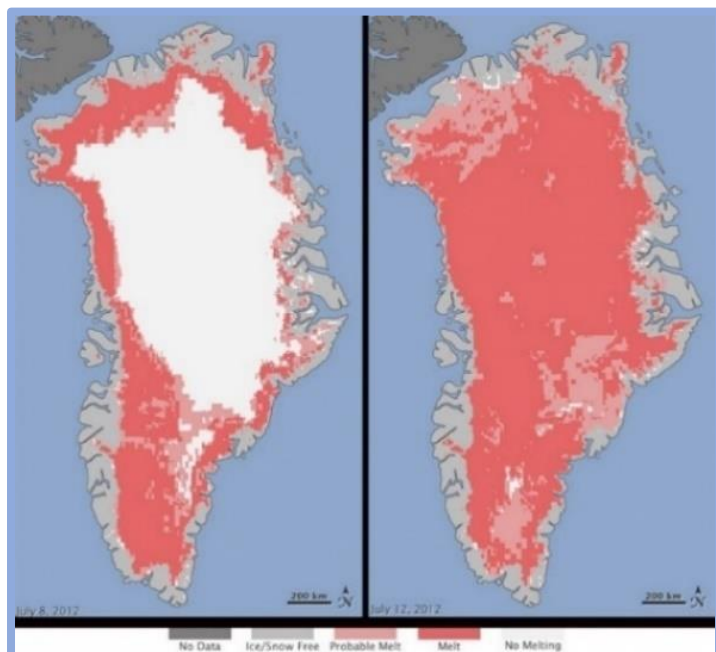


Figure 2 : Fonte des glaciers au Groenland

Inlandsis groenlandais le 8 juillet (à gauche) et le 12 juillet (à droite). Les mesures effectuées à partir de trois satellites ont montré que le 8 juillet, environ 40 p. 100 de l'inlandsis avait subi un dégel à la surface ou à proximité. En quelques jours, la fonte s'était considérablement accélérée et on estime que 97 p. 100 de la surface de l'inlandsis avait dégelé le 12 juillet. Crédit: Nicolo E. DiGirolamo, SSAI/NASA GSFC, et Jesse Allen, NASA Earth Observatory



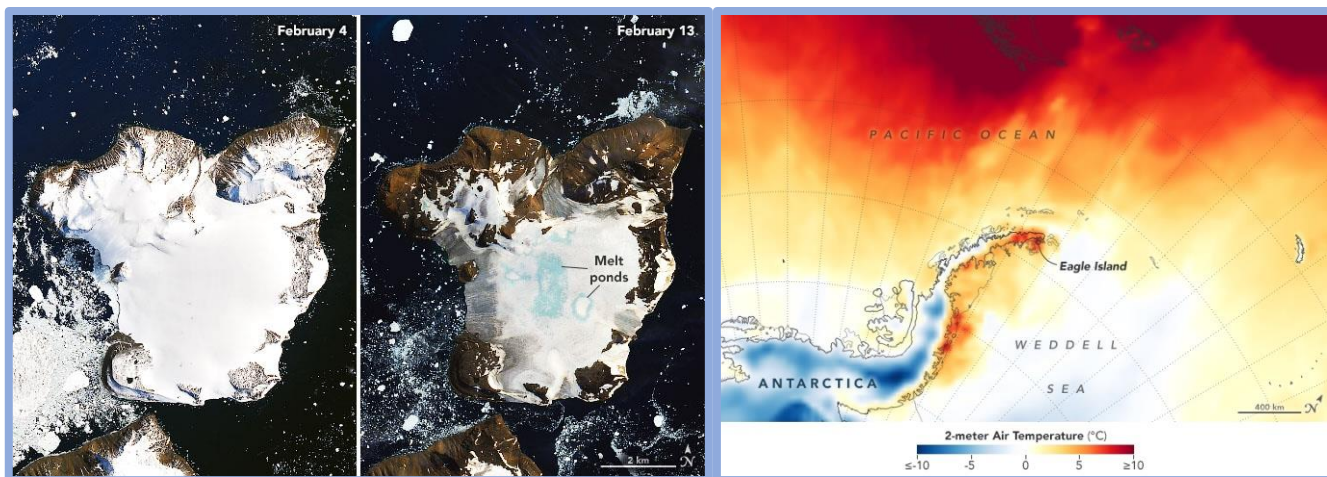


Figure 3 : Fonte des glaciers de l'Antarctique

A gauche : Le 6 février 2020, les stations météorologiques ont enregistré la température la plus élevée jamais enregistrée en Antarctique. Les thermomètres de la base d'Esperanza, à l'extrémité nord de la péninsule Antarctique, ont atteint 18,3 °C, soit à peu près la même température que à Los Angeles ce jour-là. La vague de chaleur a provoqué une fonte généralisée sur les glaciers voisins. Les températures chaudes sont arrivées le 5 février et se sont poursuivies jusqu'au 13 février 2020. Les images ci-dessus montrent la fonte sur la calotte glaciaire de l'île Eagle et ont été acquises par l'Operational Land Imager (OLI) sur Landsat 8 les 4 février et 13 février 2020.

A droite : La carte a été dérivée du modèle du Goddard Earth Observing System (GEOS) et représente la température de l'air à 2 mètres au-dessus du sol. Les zones rouges les plus sombres sont l'endroit où le modèle montre des températures dépassant 10 °C

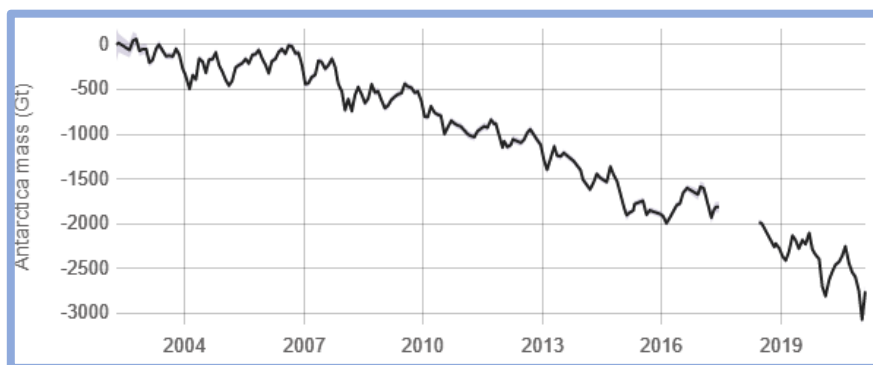


Figure 4 : Variation de masse antarctique depuis 2002. Source de données : Mesure de la masse de glace par les satellites GRACE de la NASA. L'écart représente le temps entre les missions.



Figure 5 : Variation de masse du Groenland depuis 2002. Source de données : Mesure de la masse

Les données des satellites GRACE et GRACE Follow-On de la NASA montrent que les calottes glaciaires terrestres de l'Antarctique (graphique supérieur) et du Groenland (graphique inférieur) perdent de la masse depuis 2002. La mission GRACE a conclu ses opérations scientifiques en juin 2017.

La perte de masse projetée des glaciers (à l'exclusion des calottes glaciaires) entre 2015 et 2100 atteint 18 % selon le RCP2.6 et 36 % selon le RCP8.5, ce qui correspond à un apport de 94 mm en équivalent niveau de la mer selon le RCP2.6 et de 200 selon le RCP8.5. Dans les régions où l'on trouve surtout des petits glaciers (Europe centrale, Caucase, nord de l'Asie, Scandinavie, Andes tropicales, Mexique, Afrique de l'Est et Indonésie), leur perte de masse devrait excéder 80 % d'ici à 2100 selon le RCP8.5 et beaucoup de glaciers devraient disparaître quel que soit le niveau futur d'émissions. En 2100, la contribution projetée de la calotte glaciaire du Groenland à l'élévation du niveau moyen des mers atteint 0,07 m selon le RCP2.6 et 0,15 m selon le RCP8.5.



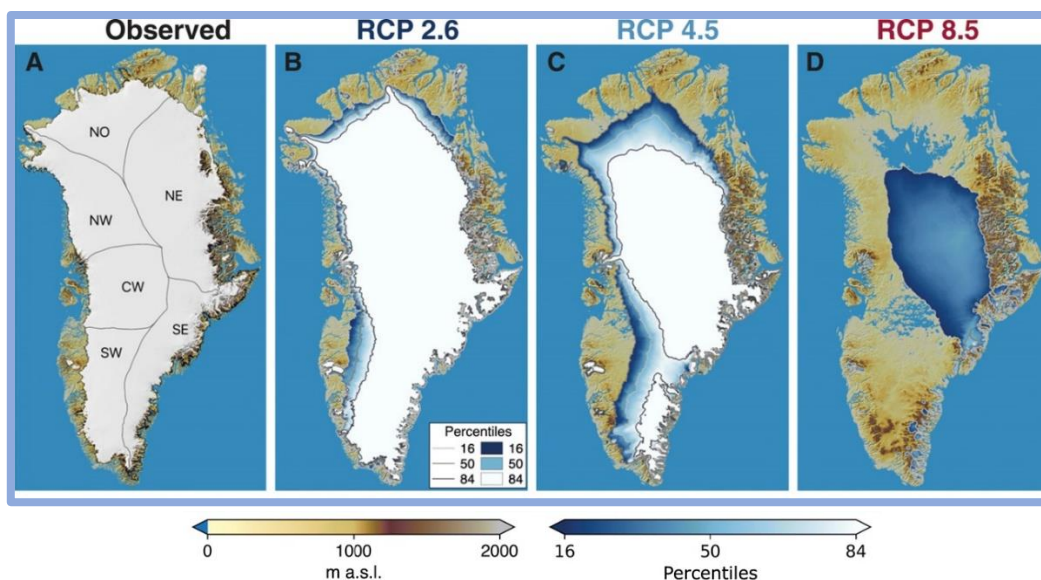


Figure 6 : État observé en 2008 et simulations de l'inlandsis groenlandais en l'an 3000.

(A) Étendue de glace observée en 2008 (53). (De B à D) Probabilité de présence de glace. Les probabilités avec des valeurs inférieures à 16% sont masquées. Les noms de bassin indiqués dans (A) dans le sens des aiguilles d'une montre sont le sud-ouest (SW), le centre-ouest (CW), le nord-ouest (NW), le nord (NO), le nord-est (NE) et le sud-est (SE). Topographie à mètres au-dessus du niveau de la mer (m a.s.l.)

Quant à la calotte glaciaire de l'Antarctique, la projection de sa contribution atteint 0,04 m en 2100 selon le RCP2.6 et 0,12 m selon le RCP8.5. Actuellement, le Groenland contribue davantage que l'Antarctique à l'élévation du niveau de la mer, mais l'Antarctique pourrait devenir un plus grand contributeur d'ici à la fin du XX<sup>e</sup> siècle en cas de recul rapide. Au-delà de 2100, l'écart grandissant entre la contribution du Groenland et de l'Antarctique à l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe selon le RCP8.5 aurait des conséquences marquées sur le rythme de l'élévation du niveau relatif de la mer dans l'hémisphère Nord.

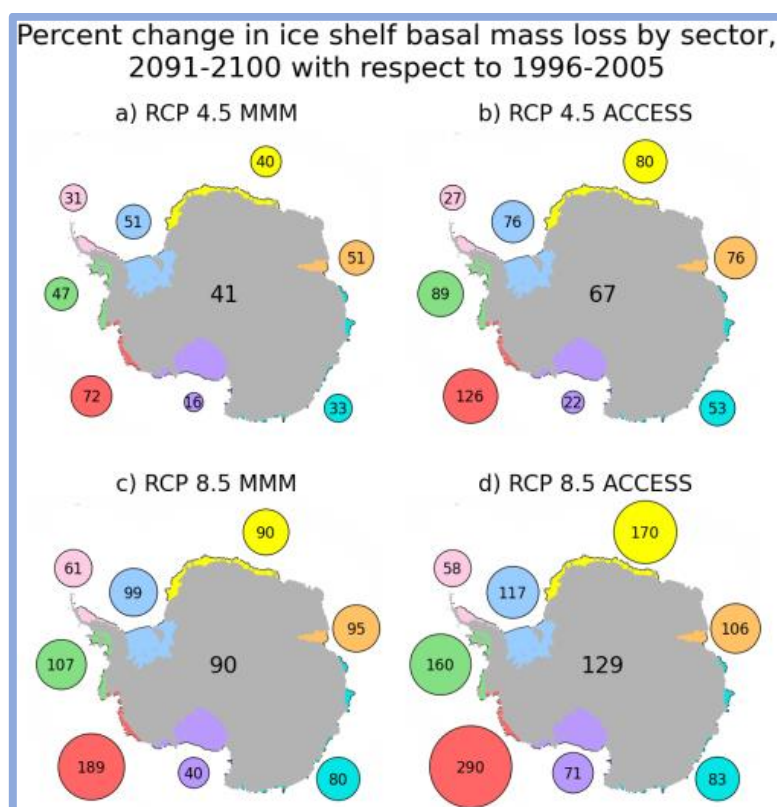


Figure 7 : Variation en pourcentage de la perte de masse basale de la plate-forme de glace pour chaque simulation du RCP.

Les changements sont calculés entre la moyenne de 1996-2005 et la moyenne de 2091-2100. Les résultats sont divisés en huit secteurs de l'Antarctique, codés en couleur comme suit : Glacier Filchner-Ronne (bleu), région orientale de Weddell (jaune), Glacier Amery (orange), secteur australien (sarcelle), mer de Ross (pourpre), mer d'Amundsen (rouge), mer de Bellingshausen (vert) et Glacier de Larsen (rose). La zone de chaque cercle coloré est proportionnelle à la valeur écrite à l'intérieur, qui est le changement de pourcentage dans la perte de masse basale pour ce secteur. Le nombre écrit dans le centre du continent est le changement l'ensemble de l'Antarctique

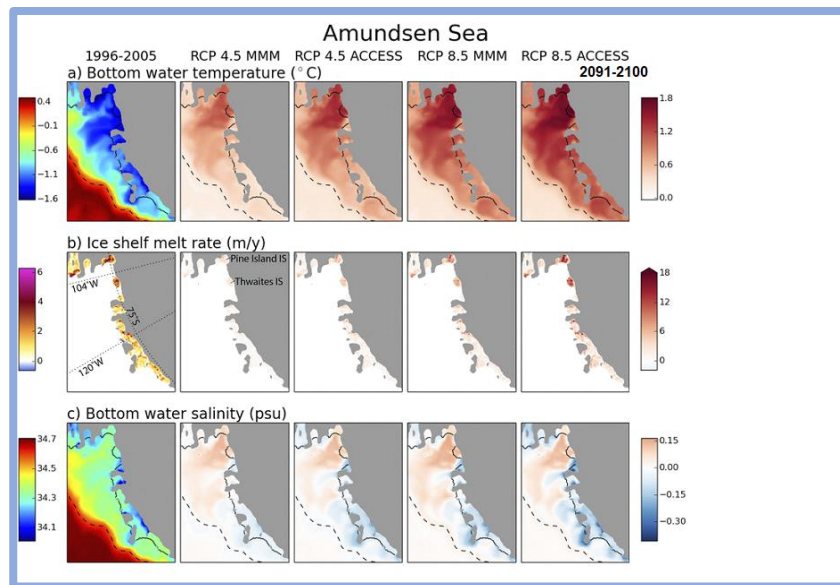


Figure 8 : Evolution des conditions dans la mer d'Amundsen

Conditions dans la région de la mer d'Amundsen, montrant les valeurs absolues pour la période de 1996-2005 (à gauche) et les anomalies par rapport à cette référence pour la période 2091-2100 pour chaque simulation RCP (colonnes suivantes) et (à droite). a) Température de l'eau du fond (°C). La ligne noire pointillée montre l'isobathe de 1500 m, qui se rapproche de la rupture du plateau continental. b) Taux de fonte des glaciers ( $\text{m.an}^{-1}$ ). L'échelle de couleur des anomalies est plafonnée à  $18 \text{ m.an}^{-1}$  pour la visibilité ; l'anomalie maximale est de  $24,8 \text{ m.an}^{-1}$ . c) Salinité de l'eau du fond (psu)

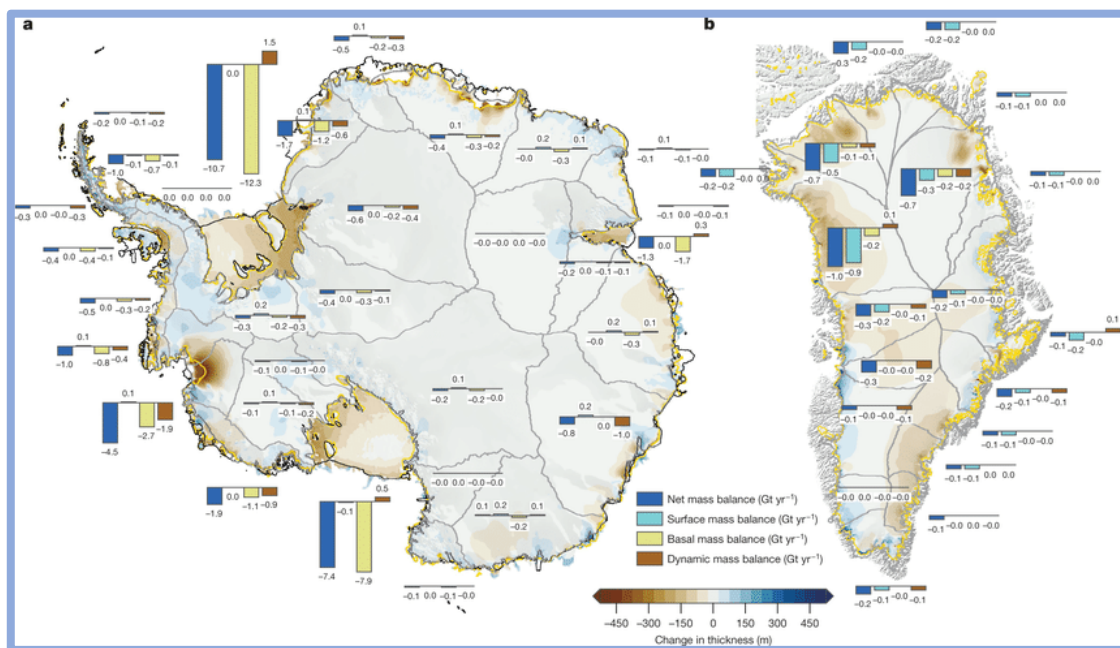


Figure 9 : Causes des changements dans l'épaisseur de l'inlandsis d'ici 2100

a, b, Modèles simulés de changements dans l'épaisseur de l'inlandsis d'ici 2100, par rapport à 2000, en Antarctique (a) et au Groenland (b) sous RCP8.5 et incorporant des rétroactions glace-océan-atmosphère. Notez l'amincissement et le recul généralisés du glacier Thwaites en Antarctique (a) et l'amincissement périphérique autour d'une grande partie de l'inlandsis groenlandais (b). Les diagrammes à barres attribuent le changement de masse aux différents composants d'équilibre de masse. Les valeurs de perte de masse sont calculées comme la différence entre le total annuel intégré au bassin versant en 2100 et à 2000. Les lignes grises désignent les contours des bassins hydrographiques. De minces lignes noires montrent les positions actuelles de la ligne d'échouement (zone située entre la partie où les glaces flottent et celle où elles reposent sur la terre) et de la ligne de vélage (désagrégation du glacier). Les lignes d'or montrent des épaisseurs de glace au sol modélisées en 2100.

## 1.2 Réduction de l'étendue et de l'épaisseur de la banquise

Entre 1979 et 2018, l'étendue de la glace de mer de l'Arctique a diminué, et ce pour tous les mois de l'année, les réductions au mois de septembre ont atteint 12,8 %. De telles modifications de l'étendue de la glace de mer en septembre sont sans précédent depuis mille ans au moins. La glace de mer de l'Arctique a perdu de l'épaisseur, avec une transition concomitante vers une glace plus jeune : en superficie, la proportion de glace pluriannuelle d'au moins cinq ans a chuté d'à peu près 90 % au cours de la période 1979-2018. Les rétroactions induites par la diminution de l'extension estivale de la glace de mer et du manteau neigeux terrestre de printemps ont contribué à

amplifier le réchauffement dans l'Arctique où la température de l'air en surface a probablement augmenté ces deux dernières décennies de plus du double par rapport à la moyenne planétaire. Les changements de glace de mer de l'Arctique peuvent également affecter les conditions météorologiques aux latitudes moyennes. La glace de mer de l'Antarctique ne présente aucune tendance statistiquement significative (1979-2018) en raison de signaux régionaux contrastés et de la forte variabilité interannuelle

D'après les projections, le déclin de la glace de mer Arctique se poursuivra jusqu'au milieu du siècle, avec des différences par la suite en fonction de l'ampleur du réchauffement planétaire : pour un réchauffement stabilisé à 1,5 °C, la probabilité annuelle d'absence de glaces de mer en septembre est de 1 % environ à la fin du siècle, chiffre qui passe à 10-35 % avec un réchauffement stabilisé à 2 °C

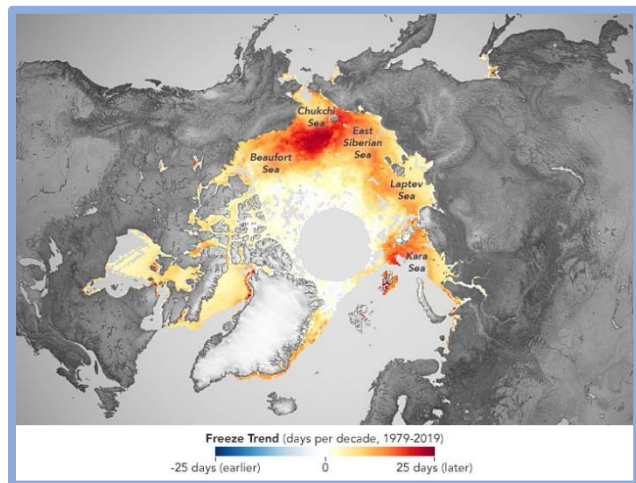


Figure 10 : Evolution des glaces de mers au niveau de l'Océan Arctique

Tout au long de l'année 2020, l'océan Arctique et les mers environnantes ont subi plusieurs événements météorologiques et climatiques notables. Au printemps, une vague de chaleur persistante sur la Sibérie a provoqué la fonte rapide de la glace de mer dans les mers de Sibérie orientale et de Laptev. À la fin de l'été, la couverture de glace de l'océan Arctique a fondu jusqu'à la deuxième plus faible étendue minimale jamais enregistrée. En automne, le gel annuel de la glace de mer a pris un départ tardif et lent. Quarante ans de données satellitaires montrent que 2020 n'était que la dernière d'une période de plusieurs décennies de déclin de la glace de mer dans l'Arctique. Les saisons de fonte plus longues sont le résultat de débuts de plus en plus précoces de la fonte printanière et du gel de plus en plus tard en automne. La carte ci-dessus montre les tendances dans le début du gel de 1979 à 2019. En moyenne dans l'ensemble de l'océan Arctique, le gel se produit environ une semaine plus tard par décennie. Cela équivaut à près d'un mois plus tard depuis le début de l'enregistrement par satellite en 1979. Le changement fait partie d'un cycle appelé « rétroaction glace-albédo ». L'eau en haute mer absorbe 90 % de l'énergie solaire alors que la glace de mer brillante en reflète 80 %. Avec de plus grandes zones de l'océan Arctique exposées à l'énergie solaire au début de la saison, plus de chaleur peut être absorbée, un modèle qui renforce la fonte. Tant que cette chaleur ne s'échappe pas dans l'atmosphère, la glace de mer ne peut pas se reformer.

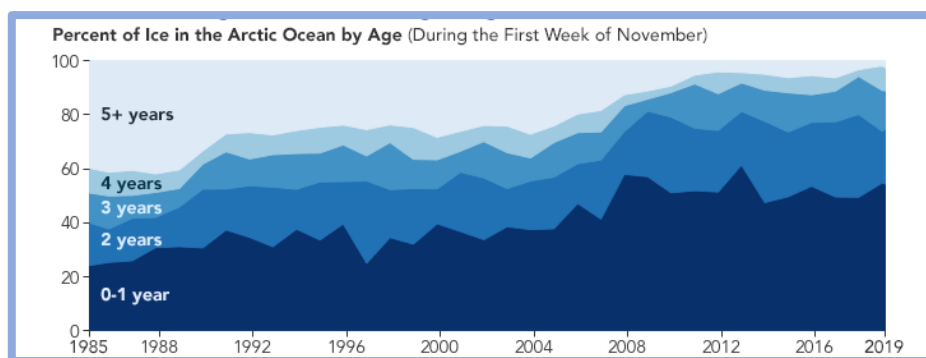


Figure 11 : Evolution de l'âge de la glace de mer dans l'Océan Arctique

Le graphique ci-dessus montre une autre façon dont l'Arctique évolue : l'âge moyen de la glace de mer est de plus en plus jeune. Au début des mesures satellites, une grande partie de la glace qui recouvrait l'océan Arctique avait plus de quatre ans. Aujourd'hui, la majeure partie de la glace qui recouvre l'océan Arctique est de la « glace de première année », c'est-à-dire de la glace qui se forme en hiver et qui ne survit pas à une seule saison de fonte estivale. Dominée par de la glace mince de première année, ainsi que par des glaces plus anciennes éclaircies par l'eau chaude de l'océan, la banquise arctique devient de plus en plus fragile.

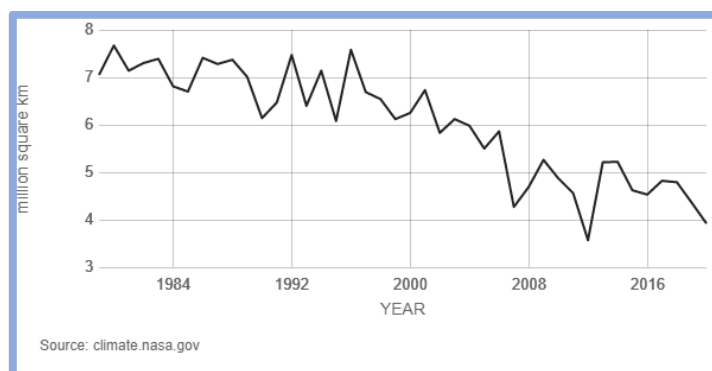


Figure 12 : Extension minimales des glaces de mer dans l'Océan Arctique en septembre. Source de données : Observations par satellite. Crédit: NSIDC/NASA



La glace de mer arctique atteint son minimum chaque mois de septembre. Septembre La glace de mer de l'Arctique diminue maintenant à un taux de 13,1 % par décennie, par rapport à la moyenne de 1981 à 2010. Ce graphique montre l'étendue mensuelle moyenne de la glace de mer dans l'Arctique chaque mois de septembre depuis 1979, à partir d'observations satellitaires.

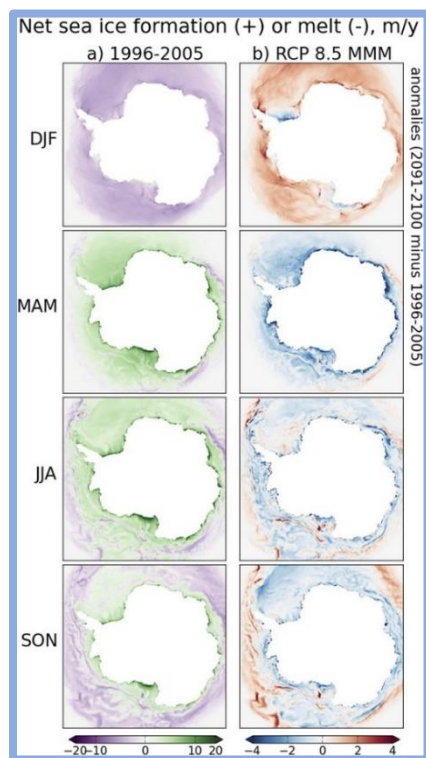


Figure 13 : Fonte des glaces de mer en Antarctique

(a) Formation nette de glace de mer (positive) ou de fonte (négative) ( $\text{m.an}^{-1}$ ) pour chaque saison dans la moyenne de 1996-2005. L'échelle de couleur n'est pas linéaire.

(b) Anomalies pour 2091-2100 par rapport à 1996-2005 dans la simulation RCP8,5

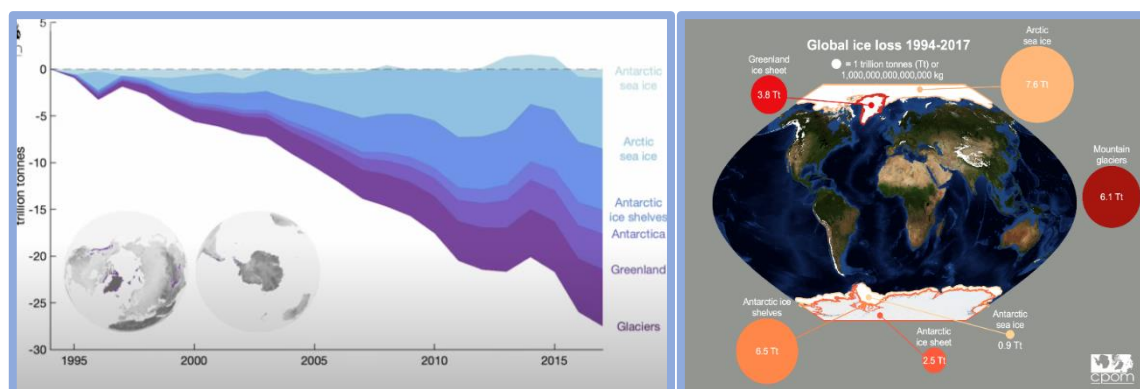


Figure 14 : Pertes au sein de la Cryosphère

### 1.3 Changement climatique et élévation du niveau marin

\*

Le niveau moyen de la mer s'élève à l'échelle planétaire avec une accélération au cours des dernières décennies en raison d'une perte croissante de glace des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, en plus de la perte continue de masse des glaciers et de la dilatation thermique de l'océan. Le renforcement des vents et des pluies lors des cyclones tropicaux et l'augmentation des vagues extrêmes, s'ajoutant à l'élévation du niveau relatif de la mer, exacerbent les événements de niveau marin extrême et les aléas côtiers

L'élévation totale du niveau moyen de la mer global pour la période 1902-2015 est de 0,16 m. Le rythme d'élévation entre 2006 et 2015, soit  $3,6 \text{ mm.an}^{-1}$  est sans précédent au cours du siècle dernier et correspond à environ 2,5 fois le taux de la période 1901-1990, soit  $1,4 \text{ mm.an}^{-1}$ . De 2006 à 2015, l'apport cumulé des calottes glaciaires et des glaciers a été la source principale d'élévation du niveau de la mer ( $1,8 \text{ mm.an}^{-1}$ ), excédant l'effet de la dilatation thermique des eaux océaniques ( $1,4 \text{ mm.an}^{-1}$ ).

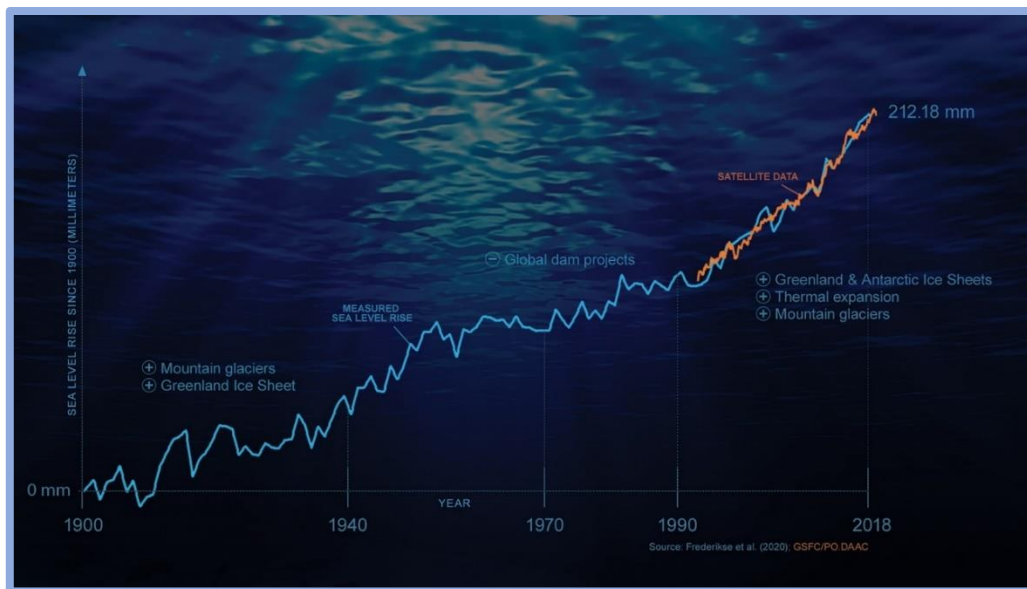


Figure 15 : Evolution du niveau marin depuis 1900 et origine de cette élévation

Cette infographie montre l'élévation du niveau de la mer depuis 1900. Avant 1940, les glaciers et l'eau de fonte du Groenland dominaient la hausse ; les projets de barrages ont ralenti la hausse dans les années 1970. Maintenant, l'inlandsis et la fonte des glaciers, ainsi que l'expansion thermique, dominent la hausse. Données de jauge de marée indiquées dans les données bleues et satellitaires en orange.

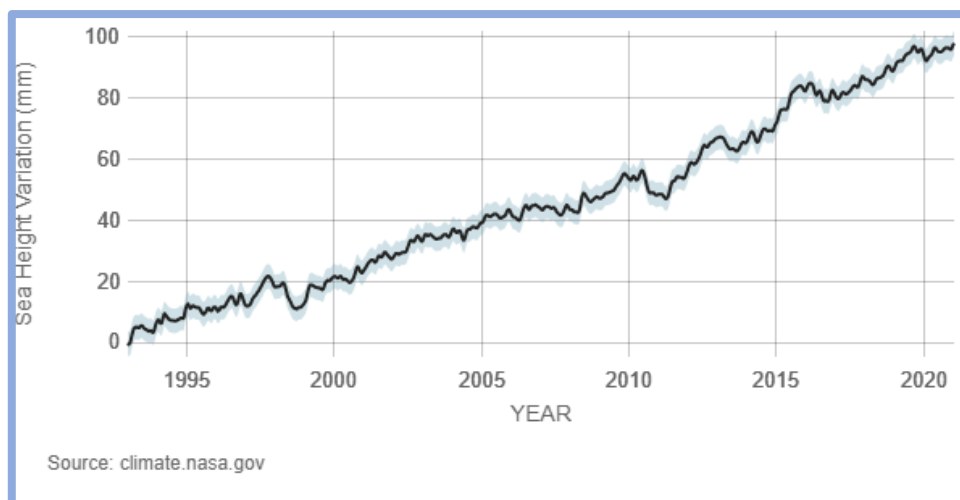


Figure 16 : Evolution du niveau de la mer depuis 1993 mesurée par satellite

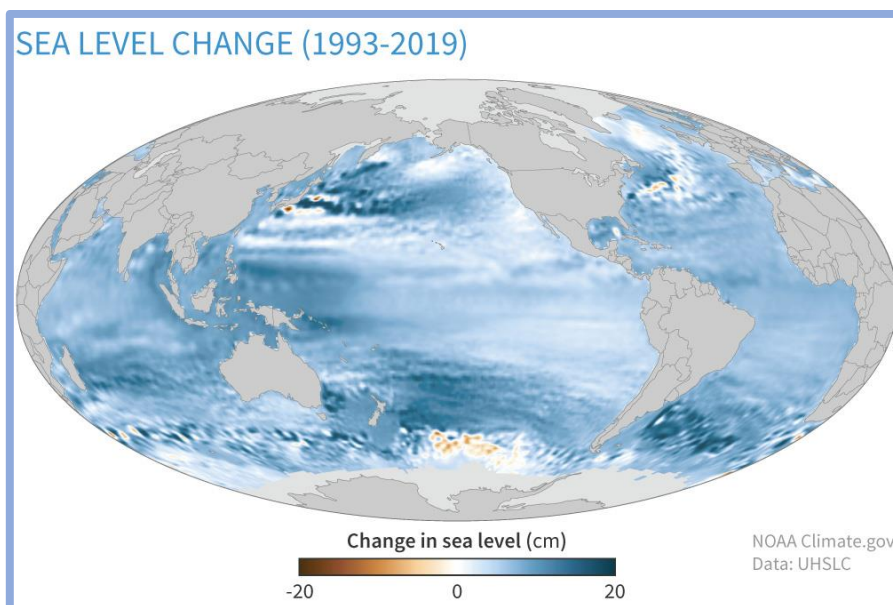


Figure 17 : Carte d'élévation du niveau de la mer

Entre 1993 et 2018, le niveau moyen de la mer a augmenté dans la majeure partie de l'océan mondial (couleurs bleues). Dans certains bassins océaniques, le niveau de la mer a augmenté de 15 à 20 centimètres. Les taux du niveau local de la mer (points) peuvent être amplifiés par des processus géologiques comme le tassement du sol ou compensés par des processus comme le rebond séculaire des masses terrestres lié à la perte des glaciers de l'ère glaciaire.

L'élévation du niveau de la mer a accéléré en raison de l'augmentation de la perte combinée de glace des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. La perte de masse de l'Antarctique a triplé sur la période 2007-2016 par rapport à la période 1997-2006. Pour le Groenland, elle a doublé sur la même période. Une accélération de l'écoulement et du recul de la calotte Antarctique, qui a le potentiel d'élever le niveau de la mer de plusieurs mètres en quelques siècles, est observée dans la baie de la mer d'Amundsen (Antarctique de l'Ouest) et dans la terre de Wilkes (Antarctique de l'Est). Il est possible que ces changements marquent le début d'une instabilité irréversible de la calotte glaciaire dans ces régions. L'incertitude sur le démarrage d'une instabilité de la calotte glaciaire provient d'observations limitées, d'une représentation inadéquate de certains processus dynamiques spécifiques des calottes glaciaires dans les modèles, et d'une compréhension limitée des interactions complexes entre l'atmosphère, l'océan et les calottes glaciaires.

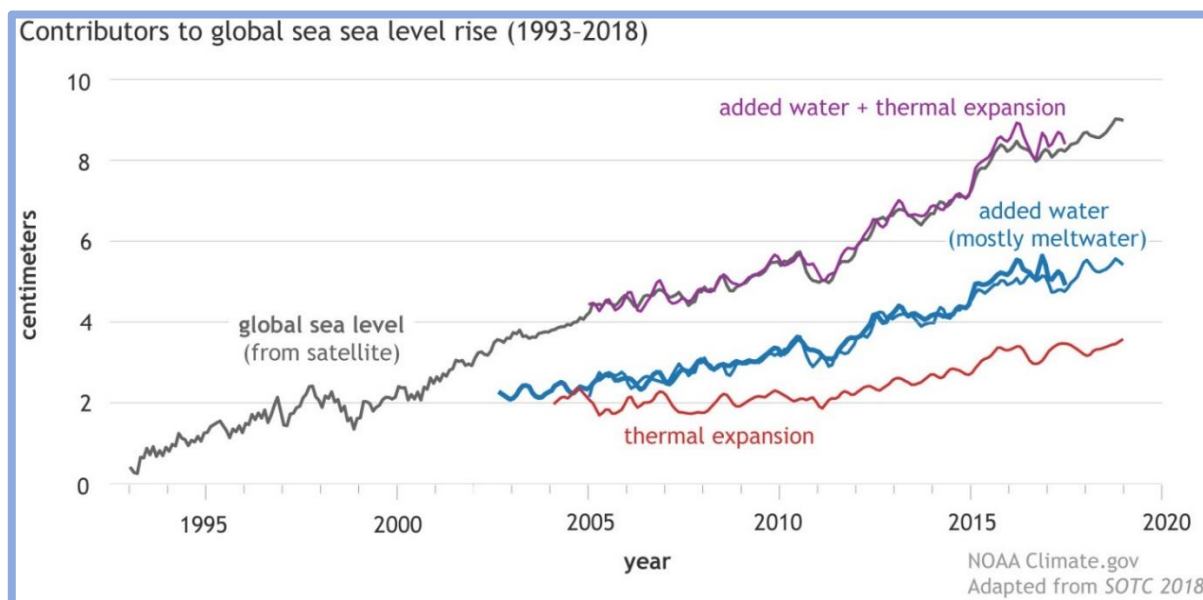


Figure 18 : Contribution des différents acteurs responsables de l'élévation du niveau de la mer

L'élévation du niveau de la mer n'est pas uniforme partout sur la planète et varie d'une région à l'autre. Les écarts régionaux, de  $\pm 30\%$  par rapport à l'élévation moyenne globale, sont dus aux pertes de glace continentale et aux variations du réchauffement de l'océan et de sa circulation. Les écarts par rapport à la moyenne globale peuvent être plus grands dans les zones concernées par un mouvement vertical rapide des terres émergées, celui-ci pouvant provenir de l'effet d'activités humaines locales (prélèvement d'eaux souterraines, par exemple).



Figure 19 : Origine des variations géographiques de l'élévation du niveau de la mer



Tout comme la surface de la Terre n'est pas plate, la surface de l'océan n'est pas non plus plate. L'élévation du niveau de la mer à des endroits spécifiques peut être plus ou moins supérieure à la moyenne mondiale en raison de nombreux facteurs locaux tels que les différentes températures de l'eau de mer, les courants océaniques, les changements des vents moyens et des pressions atmosphériques, les changements dans la quantité d'eau sur terre et les ajustements gravitationnels dus à la perte de glace et si la terre rebondit encore maintenant soulagée du poids lourd des glaciers de l'ère glaciaire.

Les hauteurs extrêmes de vagues, qui contribuent aux niveaux marins extrêmes, à l'érosion des côtes et aux submersions, ont augmenté d'environ 1,0 cm.an<sup>-1</sup> et 0,8 cm.an<sup>-1</sup> dans l'océan Austral et l'Atlantique Nord pendant la période 1985-2018. Dans l'Arctique, le recul de la glace de mer a également contribué à accroître la hauteur des vagues entre 1992 et 2014.

Le changement climatique d'origine anthropique a renforcé l'intensité des précipitations la vitesse des vents et les épisodes de niveau marin extrême observés lors de certains cyclones tropicaux, ce qui a augmenté l'intensité d'événements extrêmes multiples et leurs conséquences en cascade. Il est possible que le changement climatique d'origine anthropique ait contribué ces dernières décennies au déplacement vers les pôles de l'intensité maximale des cyclones tropicaux dans la partie occidentale du Pacifique Nord, en relation avec l'élargissement de la bande climatique tropicale générée par le forçage anthropique. Des observations récentes font apparaître, sur les dernières décennies, une hausse de la proportion annuelle de cyclones tropicaux de catégorie 4 ou 5 dans le monde.

Dans le cas du RCP2.6, l'élévation moyenne projetée du niveau de la mer à l'échelle du globe atteint 0,39 m en 2081-2100 et 0,43 m en 2100 par rapport à 1986-2005. Dans le cas du RCP8.5, elle est de 0,71 m en 2081-2100 et atteint 0,84 m en 2100. Les projections de l'élévation du niveau moyen de la mer en 2100 dans le cas du RCP8.5 sont revues à la hausse de 0,1 m par rapport aux estimations du cinquième Rapport d'évaluation et la fourchette probable va au-delà d'1 m en 2100, la perte de glace de la calotte Antarctique ayant été revue à la hausse. L'incertitude des valeurs à la fin du siècle est principalement due à la contribution des calottes glaciaires, en particulier celle de l'Antarctique.

Les projections du niveau de la mer présentent des écarts régionaux par rapport à la moyenne globale. Divers processus non liés à l'évolution récente du climat, telle la subsidence locale causée par des phénomènes naturels et certaines activités humaines, jouent un rôle majeur dans la variation du niveau marin relatif à la côte. Même si l'importance relative de l'élévation du niveau de la mer due au climat croît avec le temps dans les projections, il est indispensable de prendre en compte les processus locaux dans les projections de montée des mers et leurs impacts.

Il est projeté que le rythme d'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe atteindra, en 2100, 15 mm.an<sup>-1</sup> en moyenne dans le cas du RCP8.5 et dépassera plusieurs centimètres par an au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Il atteindra 4 mm.an<sup>-1</sup> en 2100 dans le cas du RCP2.6. Les études de modélisation indiquent une montée des eaux de plusieurs mètres d'ici à 2300 (2,3-5,4 m et 0,6-1,07 m dans les cas des RCP8.5 et RCP2.6, respectivement) soulignant l'importance de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter l'ampleur de la montée du niveau des mers. Les processus qui contrôlent l'évolution temporelle du recul des plateformes de glace et l'ampleur de l'instabilité des calottes glaciaires pourraient accroître la contribution de l'Antarctique à la hausse du niveau de la mer à des valeurs nettement supérieures à la fourchette probable à l'horizon de fin de ce siècle et à plus long terme). Compte-tenu des conséquences de l'élévation du niveau de la mer en cas d'effondrement d'une partie de la calotte glaciaire Antarctique, ce risque d'impact majeur mérite d'être considéré avec attention.

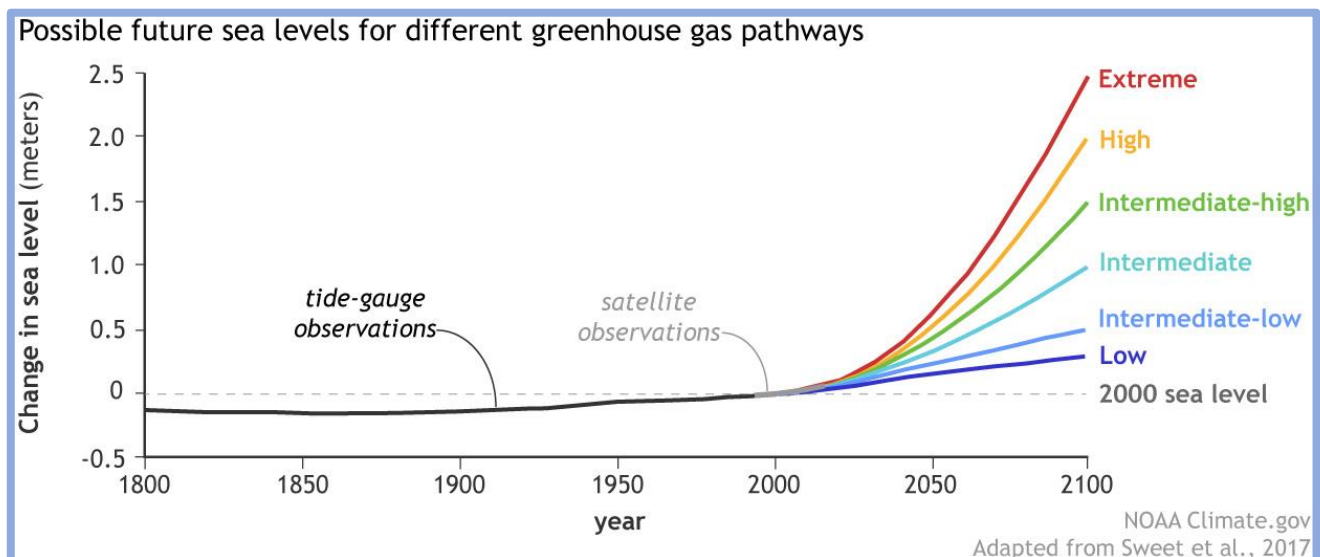


Figure 20 : Projection de l'élévation du niveau de la mer pour 2100

L'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe augmentera la fréquence des épisodes de niveaux marins extrêmes pour la plupart des littoraux étudiés dans ce rapport. Selon les projections correspondant à tous les scénarios RCP, les niveaux locaux de la mer qui n'étaient atteints qu'une fois par siècle (événements historiques centennaux) seront récurrents tous les ans au moins dans la plupart des endroits d'ici à 2100. Beaucoup de mégapoles et de petites îles (dont les petits États insulaires en développement) avec des littoraux de basse altitude subiront ces événements historiques centennaux annuellement ou plus fréquemment d'ici à 2050 dans le cas des RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. L'année où l'événement centennal historique devient un événement annuel dans les latitudes moyennes se produit le plus tôt dans le cas du scénario RCP8.5, puis dans RCP4.5 et le plus tard pour le RCP2.6. La fréquence croissante des niveaux marins extrêmes peut provoquer des impacts graves en beaucoup d'endroits, selon leur degré d'exposition.

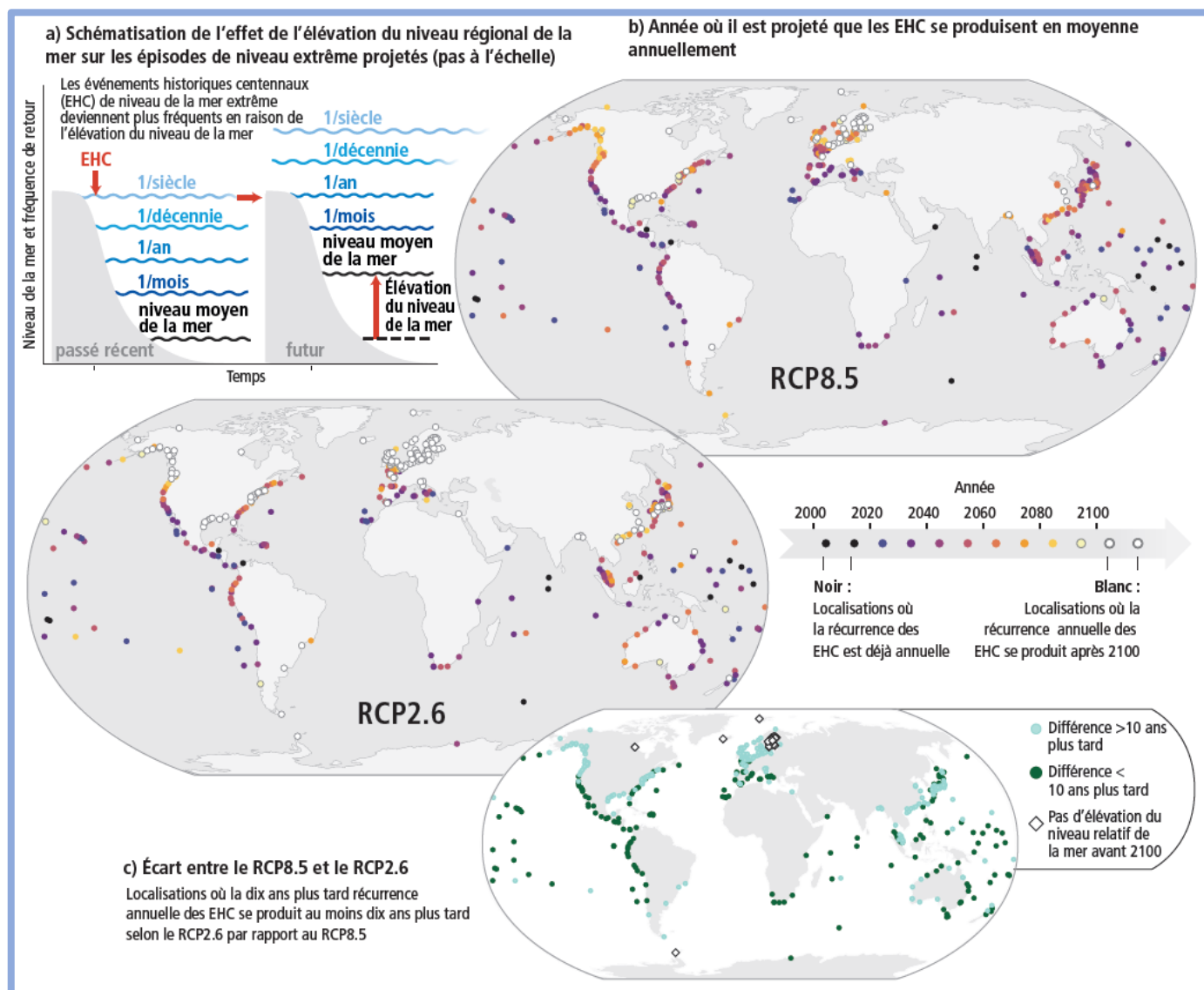


Figure 21 : Effet de l'élévation du niveau régional de la mer sur les niveaux marins extrêmes pour différents sites côtiers

Illustration schématique des événements de niveau marin extrême et de leur récurrence moyenne dans le passé récent (1986–2005) et dans le futur. Par suite de l'élévation du niveau moyen de la mer, les niveaux locaux qui revenaient historiquement une fois par siècle (événements historiques centennaux, EHC) devraient survenir plus fréquemment à l'avenir. (b) Année où les EHC se reproduiraient une fois par an en moyenne dans le cas des RCP8.5 et RCP2.6 pour les 439 localisations côtières pour lesquelles on dispose de relevés d'observation suffisants. L'absence de cercle signale l'impossibilité de procéder à une évaluation par manque de données, et non pas une exposition ou un risque inexistant. Plus la couleur du cercle est sombre, plus la transition surviendrait tôt. La fourchette probable est de  $\pm 10$  ans aux endroits où cette transition est attendue avant 2100. Un cercle blanc (33 % des sites selon le RCP2.6, 10 % selon le RCP8.5) signifie que les EHC ne devraient pas se reproduire une fois par an avant 2100. (c) Indication des localisations où le passage des EHC à des phénomènes annuels serait retardé de plus de dix ans dans le cas du RCP2.6 par rapport au RCP8.5.

Dans les projections, la hauteur des vagues importantes (hauteur moyenne, du creux à la crête, du tiers le plus élevé de toutes les vagues) augmente dans l'océan Austral et la partie tropicale du Pacifique Est, ainsi que dans la mer Baltique, et diminue dans l'Atlantique Nord et la mer Méditerranée, dans le cas du RCP8.5. L'amplitude et la configuration des marées à la côte changeront sous l'effet du niveau plus élevé de la mer et selon les mesures d'adaptation prises dans ces zones. L'évolution des paramètres des vagues due aux nouvelles conditions

météorologiques et l'évolution des marées due à un niveau marin plus élevé pourraient aggraver ou atténuer localement les aléas côtiers.

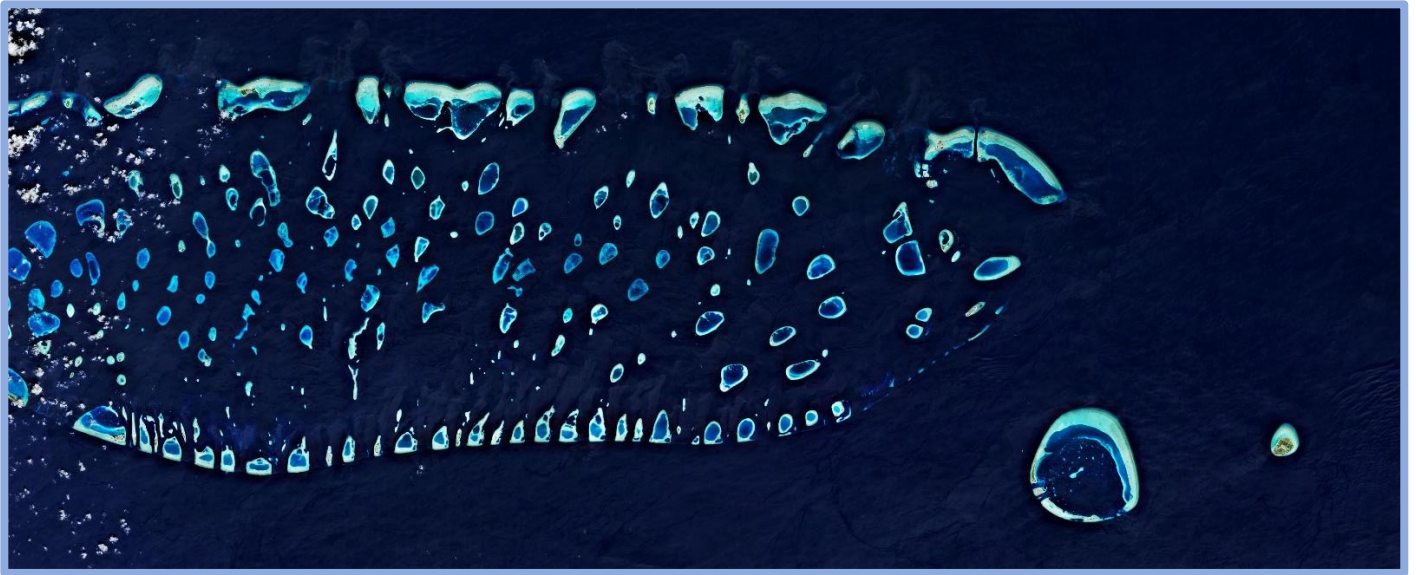


Figure 22 : Les Maldives observés depuis l'Espace

Les Maldives sont présentées dans cette image capturée par la mission Copernic Sentinel-2. Destination touristique et de plongée populaire avec ses plages de sable blanc, la République des Maldives est située dans l'océan Indien, à environ 700 km au sud-ouest du Sri Lanka. Cette nation insulaire se compose d'une chaîne d'environ 1200 petites îles coralliennes qui sont regroupées en grappes d'atolls – dispersés sur 90 000 km<sup>2</sup> d'océan. 80 % des terres des Maldives sont situées à moins d'un mètre au-dessus du niveau moyen de la mer. Cette altitude extrêmement basse rend le pays et ses habitants particulièrement vulnérables à l'élévation du niveau de la mer.

Dans les projections, l'intensité moyenne des cyclones tropicaux, la proportion de cyclones de catégorie 4 ou 5 et les taux moyens de précipitation qui leur sont associés augmentent pour tout réchauffement de 2°C par rapport à toute période de référence. L'élévation du niveau moyen de la mer provoquera une hausse des niveaux marins extrêmes liés aux cyclones tropicaux. Les aléas côtiers seront aggravés par l'augmentation de l'intensité moyenne, de l'amplitude des surcôtes liées aux tempêtes et des taux de précipitation associés aux cyclones tropicaux.

## 2. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET PHENOMENES METEOROLOGIQUES PAROXYSTIQUES : L'EXEMPLE DES CYCLONES

### 2.1 Rappel sur la circulation atmosphérique, les anticyclones, les dépressions et les tempêtes

#### 2.1.1 VENTS ET PRESSION ATMOSPHERIQUE

L'air s'écoule dans l'atmosphère des zones de haute pression (anticyclones) vers les zones de basse pression (dépressions). C'est donc la variation horizontale de la pression ou gradient horizontal de pression qui est à l'origine du vent. En d'autres termes, plus les isobares (lignes d'égale pression) sont resserrées, plus le vent va souffler fort. Les isobares étant plus rapprochées autour d'une dépression que d'un anticyclone, c'est autour de ces zones de basse pression que les vents soufflent le plus fort. Une autre force agit également sur l'air en mouvement : la force de Coriolis. Cette force est liée à la rotation de la Terre autour de son axe. Dans l'hémisphère nord, la force de Coriolis entraîne les corps en mouvement vers la droite. Sous l'effet combiné des forces de pression et de la force de Coriolis, le vent ne souffle pas directement des hautes vers les basses pressions mais il suit les isobares. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour d'un anticyclone et dans le sens contraire autour d'une dépression.



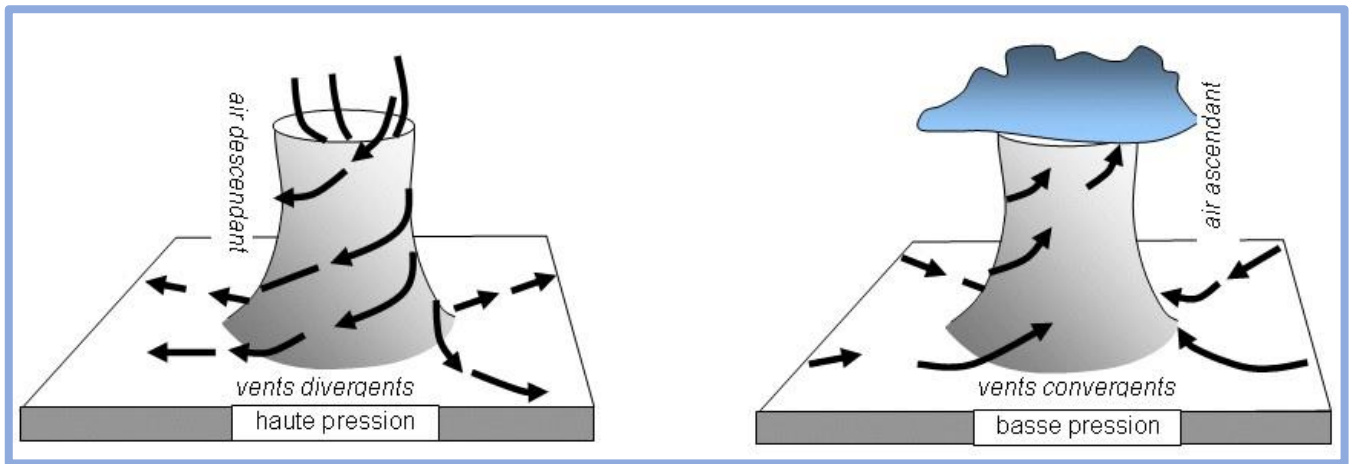
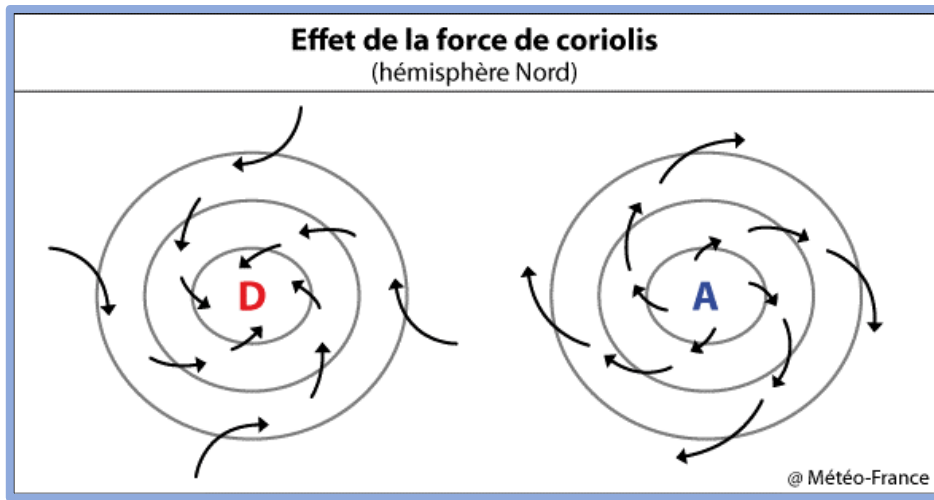


Figure 23 : Anticyclone et dépressions

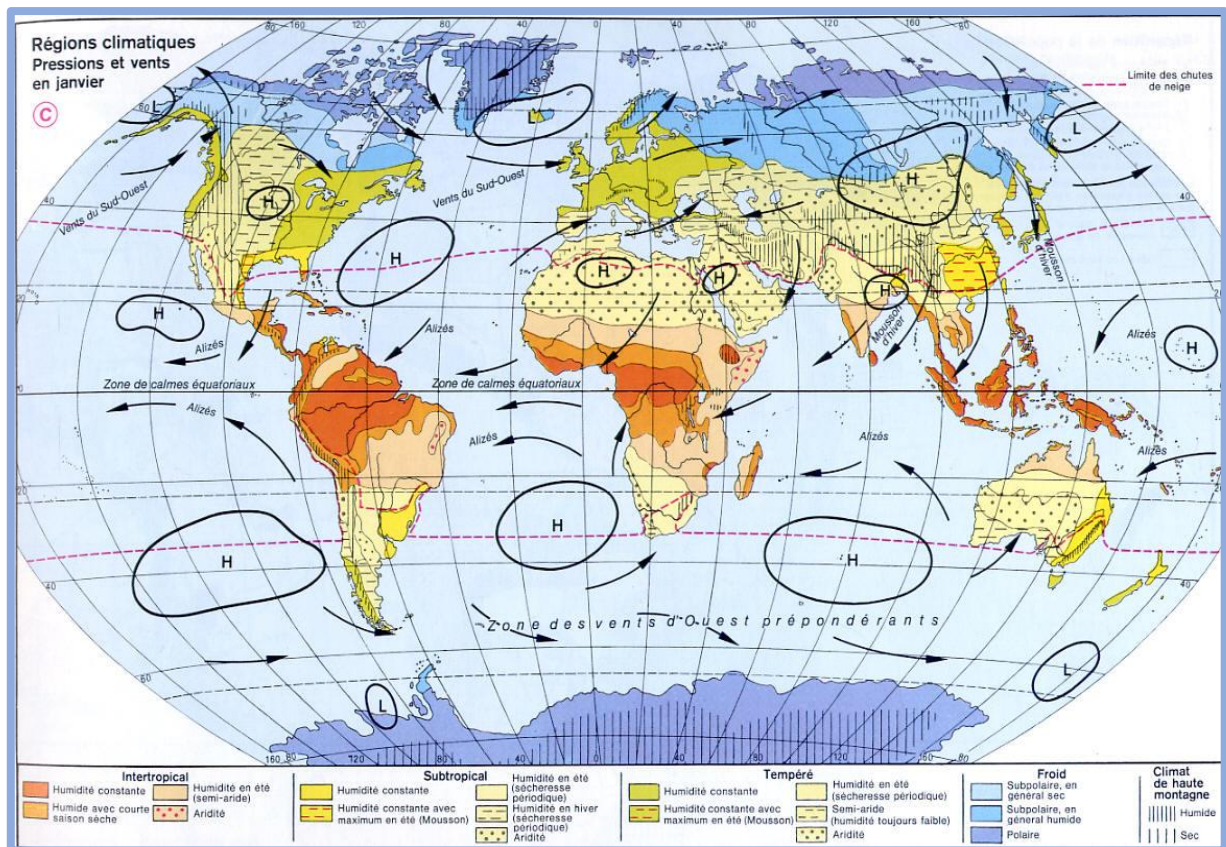


Figure 24 : Anticyclone et climats du monde

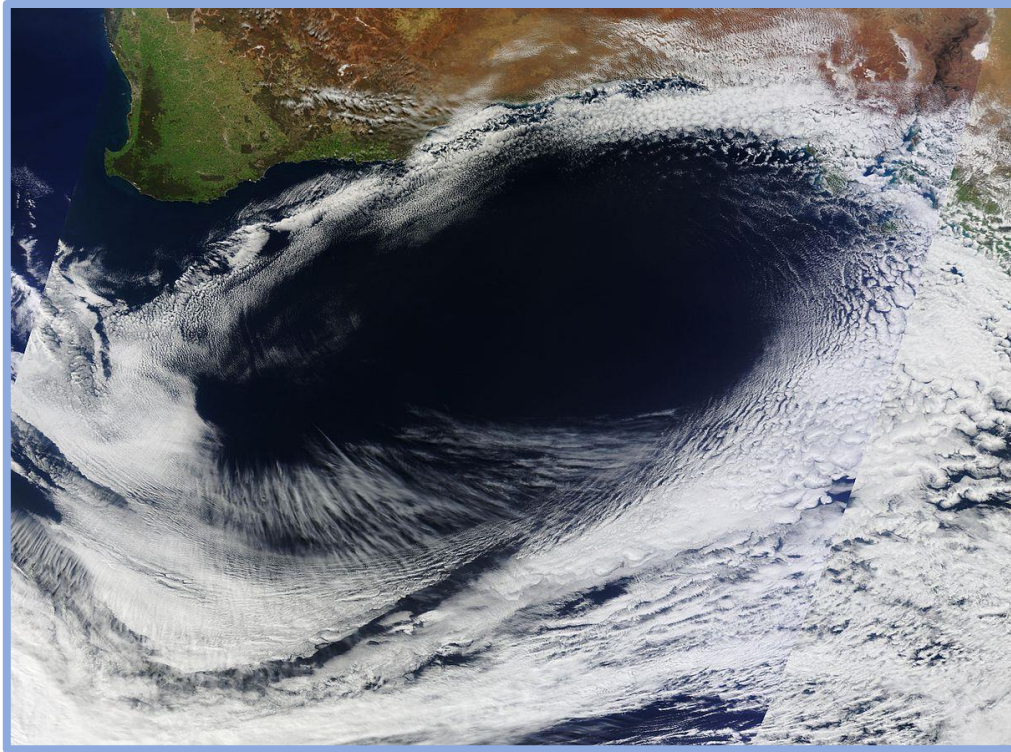


Figure 25 : Exemple d'anticyclones observé depuis l'Espace

### 2.1.2 LES DIFFERENTS TYPES DE TEMPÊTES

Les tempêtes sont assimilées à de perturbations atmosphériques qui comprennent des variations de pression atmosphérique et de vent suffisantes pour présenter des risques de dommages pouvant aller de quelques dégâts matériels à des ravages catastrophiques, et cela quelle que soit l'échelle spatiotemporelle considérée, depuis celle des tornades ou des rafales descendantes imbriquées dans un système nuageux – de l'ordre de 10 km d'extension horizontale – jusqu'à celle des dépressions extratropicales – de 2 000 à 3 000 km d'extension horizontale.

Selon la taille des phénomènes dépressionnaires et les régions du globe, on distingue :

- De l'échelle subsynoptique à l'échelle suprasynoptique : L'adjectif « synoptique » évoque l'idée de « voir en un même ensemble », « embrasser d'un coup d'œil ». En météorologie, il qualifie plus particulièrement les phénomènes atmosphériques dont l'ordre de grandeur est de quelques milliers de kilomètres pour les dimensions horizontales, de quelques kilomètres pour la dimension verticale et de quelques jours pour la durée. En deçà d'une dimension horizontale de l'ordre du millier de kilomètres, on entre dans une échelle légèrement plus restreinte, l'échelle subsynoptique, tandis qu'au-delà de 2 000 à 3 000 kilomètres de dimension horizontale on arrive dans l'échelle suprasynoptique
  - Dans les régions tropicales et subtropicales
    - Les tempêtes tropicales et les cyclones (ou ouragan, ou typhon selon les océans considérés)
      - La puissance de ces phénomènes est caractérisée par l'échelle de Saffir-Simpson
  - Dans les régions extratropicales
    - Les tempêtes extra-tropicales et les cyclones extra-tropicaux
      - La puissance de ces phénomènes est estimée en météorologie marine par l'intermédiaire de l'échelle Beaufort.
- A méso-échelle : cet adjectif correspond à des phénomènes météorologiques ayant des dimensions horizontales comprises entre 2 km et 1000 km.
  - Les orages : qui se manifeste par des décharges brusques d'électricité atmosphérique déclenchant des éclairs et des coups de tonnerre. L'orage est fréquemment accompagné par des précipitations prenant la forme d'averses ainsi que par des vents violents et possiblement de la grêle, des trombes et des tornades



Echelle de BEAUFORT							
Beaufort	Description	Noeuds de à		Km / h de à		Vagues (m) de à	
0	Calme	0		0		0.0	
1	Très légère brise	1	3	1	5	0,1	
2	Légère brise	4	6	6	11	0.2	0.5
3	Petite brise	7	10	12	19	0.6	0.9
4	Jolie brise	11	16	20	28	1.0	1.5
5	Bonne brise	17	21	29	38	2.0	2.5
6	Vent frais	22	27	39	49	3.0	4.0
7	Grand frais	28	33	50	61	4.0	5.5
8	Coup de vent	34	40	62	74	5.5	7.0
9	Fort coup de vent	41	47	75	88	7.5	10.0
10	Tempête	48	55	89	102	10.0	12.5
11	Violente tempête	56	63	103	117	12.5	14.0
12	Ouragan	64	>	118	>	16.0	>

Figure 26 : L'échelle de Beaufort

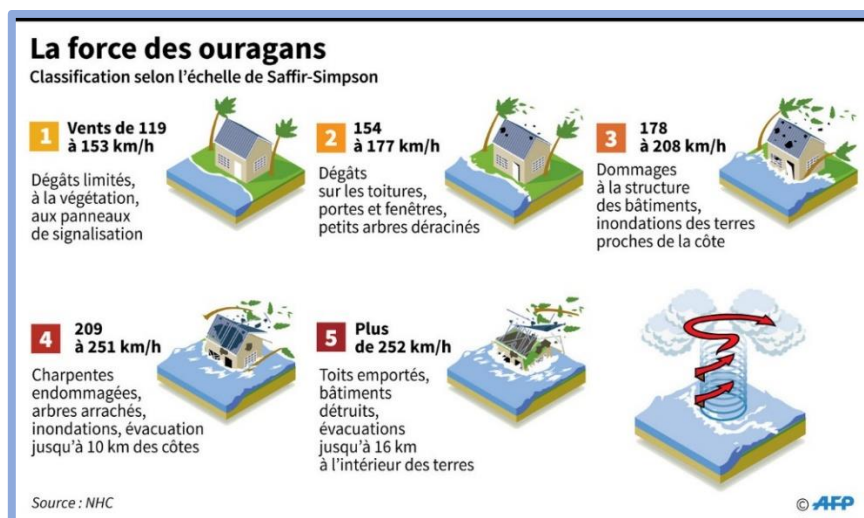


Figure 27 : L'échelle de Saffir-Simpson

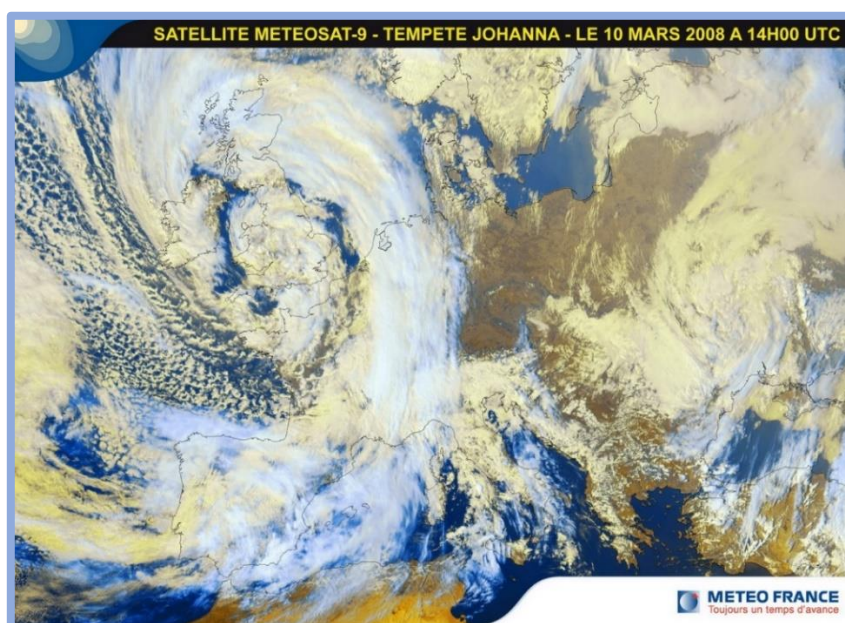


Figure 28 : Exemple de Tempête extratropicale





Figure 29 : Orage et cyclone

### 2.1.3 CONDITIONS D'APPARITION D'UNE TEMPETE

Différentes causes expliquent la formation de différents types de tempêtes. Ainsi les tempêtes extra-tropicales observées dans l'Atlantique Nord susceptibles de toucher l'Europe métropolitaine s'expliquent par la conjonction de différents éléments. Lorsqu'on observe le comportement de l'atmosphère à des échelles dont l'ordre de grandeur atteint au moins quelques heures en temps et quelques dizaines de kilomètres en étendue horizontale, on se rend compte que les déplacements de l'air y ont tendance à s'organiser suivant des vents dont les directions et les vitesses restent en général assez stables.

La température évolue avec l'altitude, l'atmosphère est donc structurée couches horizontales de même température avec un gradient positif du sol vers les altitudes plus élevées au sein de la troposphère, on parle de surfaces isothermes. Par ailleurs, la pression atmosphérique diminue également avec l'altitude : en effet la pression étant directement lié à la masse de l'atmosphère de la colonne située au niveau de la zone considérée, augmenter l'altitude revient à réduire la hauteur de la colonne et donc le nombre de particules dans cette colonne et donc la masse de l'atmosphère située dans la zone considérée), on observe donc des zones d'égales pressions horizontales : les surfaces isobares avec un gradient positif du sol vers les altitudes plus élevées.

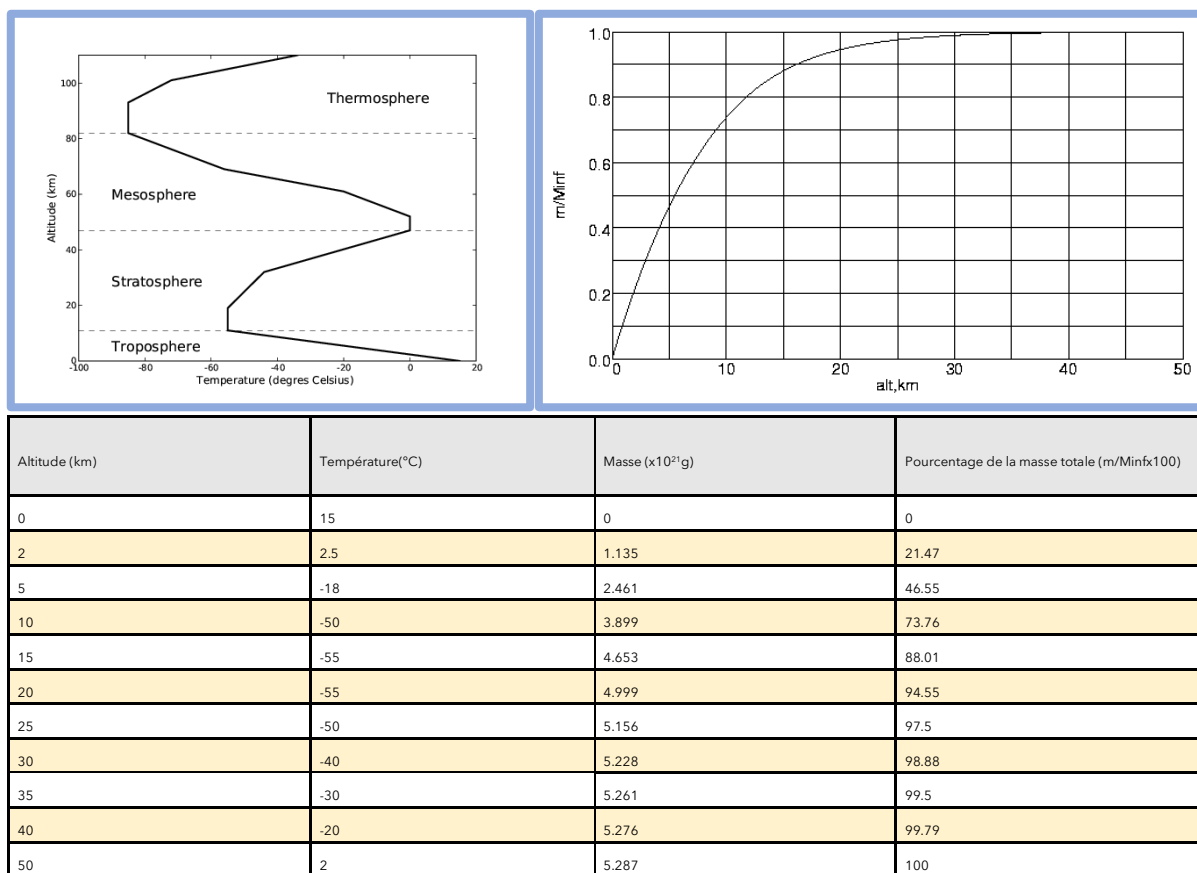


Figure 30 : Profil thermique et massique de l'atmosphère

A cause des variations méridienne de température du Nord au Sud (c'est-à-dire du Pôle Nord (froid) vers l'équateur (chaud) dans l'hémisphère Nord) qui sont de l'ordre de 1 °C par centaine de km, les surfaces isothermes ne peuvent

être horizontales du Pôle Nord à l'équateur et s'inclinent vers le haut en allant vers l'équateur et traversent les surfaces isobares, on parle de barocline, dans cette zone de fort gradient, l'équilibre de l'atmosphère est maintenu grâce à la présence en altitude de vents forts.

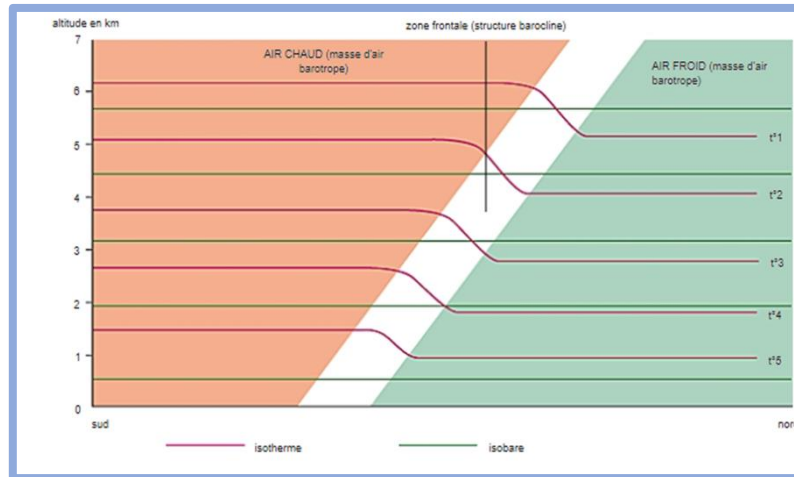


Figure 31 : Profil thermique latitudinal

L'instabilité barocline intervient lorsque les isothermes ne sont plus alignées avec les lignes de courant, si bien que les vents horizontaux transportent de l'air des régions chaudes vers les régions froides ou des régions froides vers les régions chaudes et perturbent cet équilibre. Les variations de température associées à de tels déplacements modifient la densité de l'air et la pression qui était exercée sur ces régions. Il s'ensuit une modification des vents soufflant aux différentes altitudes et la mise en place d'une circulation verticale de compensation qui, le plus souvent, génère une ascendance d'air chaud à l'est du courant perturbé et une descente d'air froid à l'ouest. Ce genre de situation est favorable au développement des perturbations et des tempêtes qui balayent les zones tempérées en hiver et au printemps

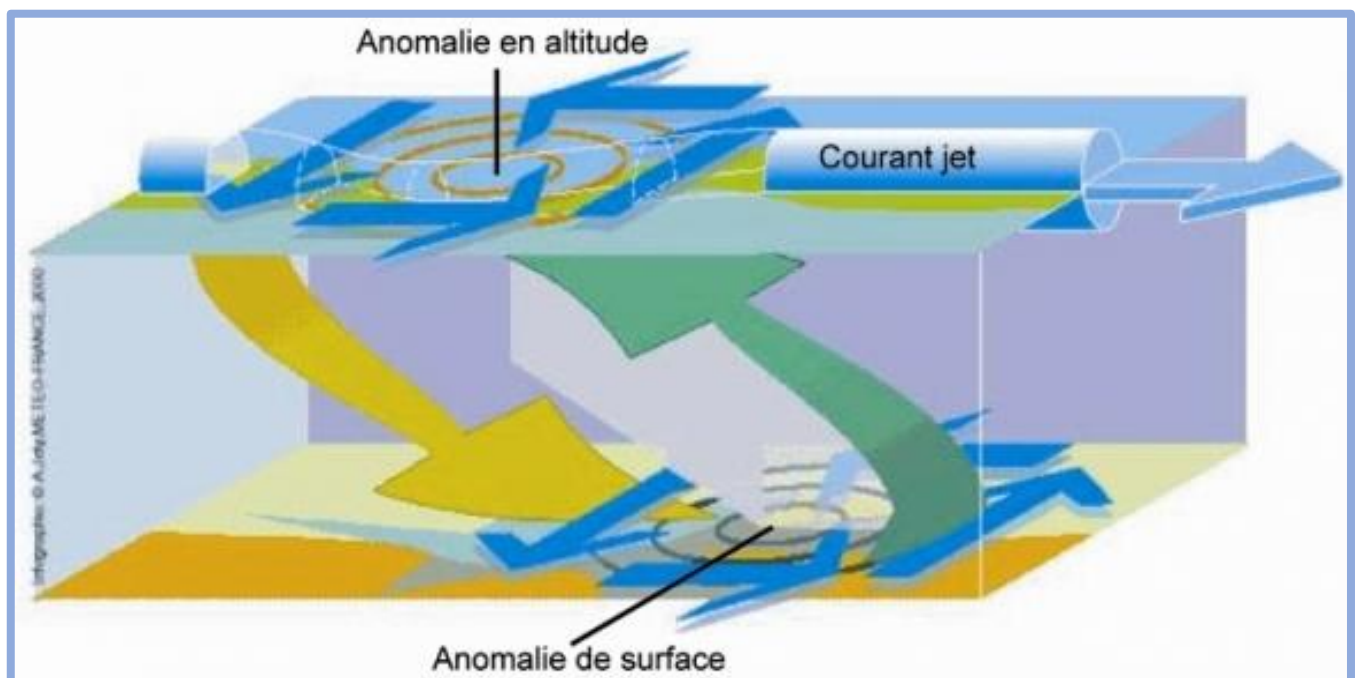


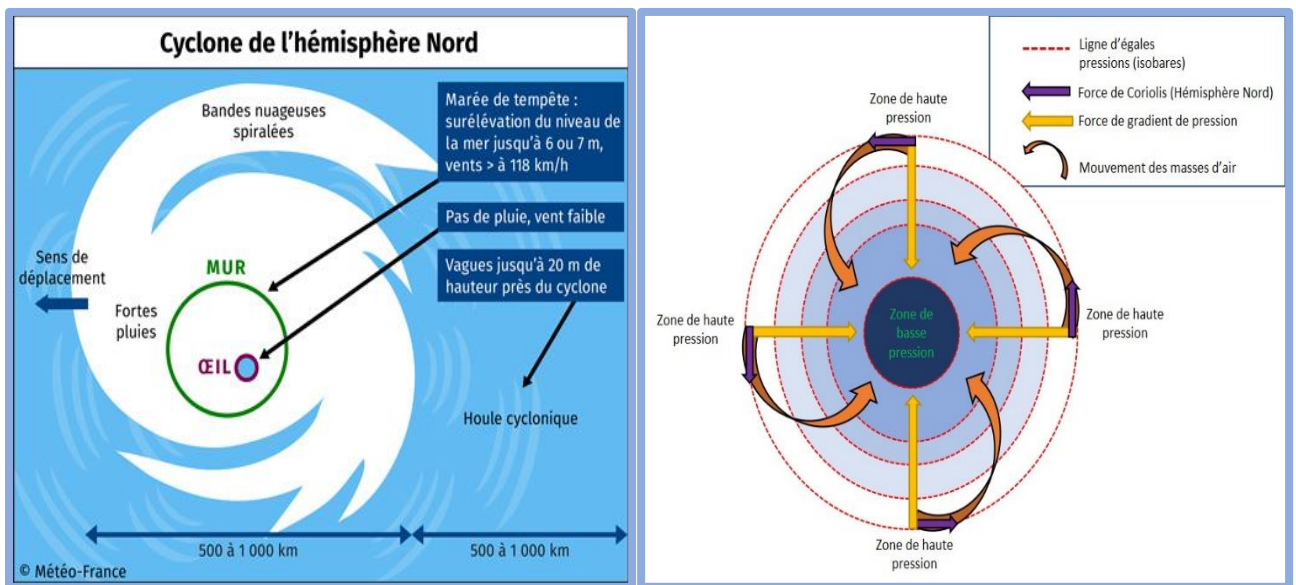
Figure 32 : Instabilité barocline et alimentation des tempêtes

Par ailleurs, le fréquent maintien à très haute altitude vers la tropopause, d'un puissant courant-jet prenant naissance au-dessus de Terre-Neuve et gardant des vitesses impressionnantes – plus de 200 km/h – au-dessus de l'Europe du Nord en raison de l'absence de frottement à pareille altitude de la part des eaux océaniques. Le courant-jet agit comme un véritable transporteur de tourbillon d'ouest en est, au point qu'on a coutume de le désigner comme le « rail » des perturbations nord-atlantiques, car c'est parmi ces zones à tourbillon élevé qu'iront parfois se cacher les précurseurs des tempêtes – des noyaux de tourbillon « potentiellement » évolutifs.

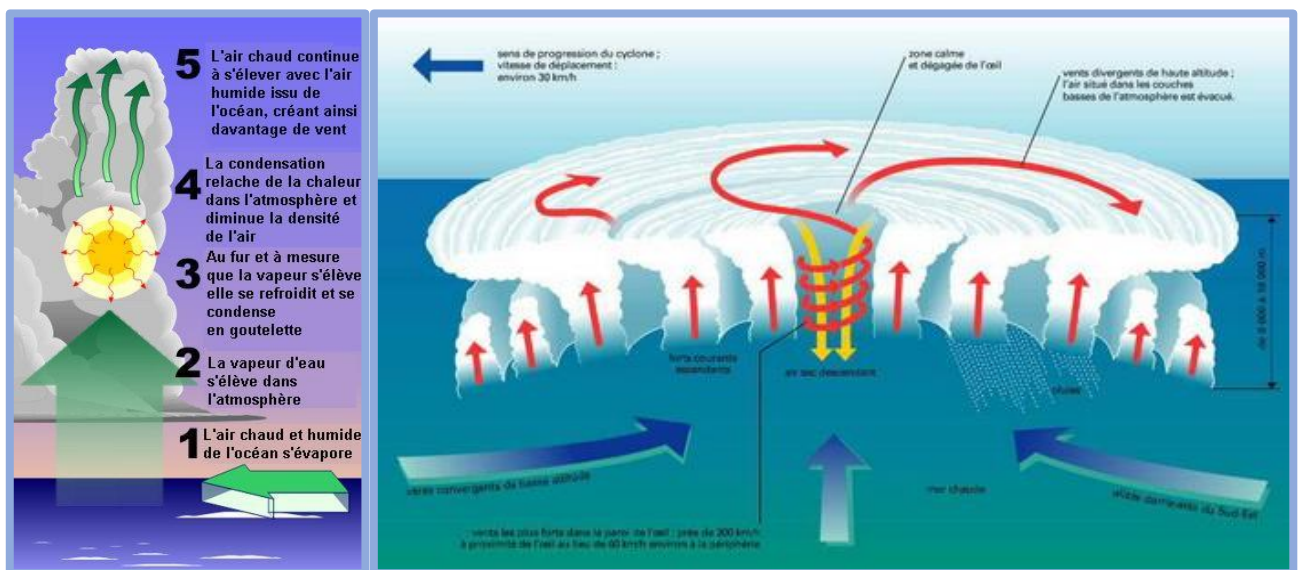
## 2.1.4 LE CAS DES CYCLONES

Un cyclone naît et se développe uniquement si les conditions suivantes sont réunies :

- Une condition thermique : une température de la mer supérieure à 26 °C sur une épaisseur minimale de 50 m. L'évaporation de surface de grandes quantités d'eau fournit l'énergie nécessaire pour entretenir le système de machine à vapeur qu'est une formation cyclonique. Si l'eau est trop froide, le cyclone ne peut pas se former ou, s'il était déjà formé préalablement, il s'affaiblit puis finit par perdre ses caractéristiques cycloniques tropicales. Cette condition thermique en fait ainsi un phénomène essentiellement maritime (depuis sa naissance jusqu'à sa maturité). En pénétrant sur terre, son énergie tend rapidement à décroître
- Une condition géographique : être suffisamment éloigné de l'Équateur de façon à ce que la force de Coriolis ne soit pas nulle. Cette force, engendrée par la rotation terrestre, imprime une déviation du vent vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Elle est nulle à l'Équateur. C'est elle qui intervient pour déclencher le mouvement tourbillonnaire initial.
- Une forte humidité, indispensable à la formation des cumulonimbus. La formation d'un cyclone est impossible pour une humidité inférieure à 40 %, fréquente lorsqu'elle est supérieure à 70 % ;



**Figure 33 : Structure d'un cyclone**



**Figure 34 : Formation d'un cyclone**

L'enroulement des vents qui engendre la formation du cyclone résulte d'un équilibre entre le mouvement des vents entre les zones de hautes et basses pressions (donc vers le centre du cyclone) engendré par la force de gradient de pression et la force de Coriolis centrifuge. Cet enroulement se fera suivant les lignes d'égales pressions. Cet enroulement est tributaire de :



- La préexistence d'une zone dépressionnaire, d'un amas nuageux, d'une ligne de grains ou encore d'une onde tropicale associée à de la convection et à un faible mouvement d'air convergent de basses couches. Cette convergence crée les mouvements ascendants, permettant à l'air humide de s'élever
- La présence de vents en altitude (jusqu'à 15 km). Ces vents doivent être relativement homogènes : même direction et même force ou presque. Dans le cas contraire, l'énergie développée par le système va se disperser et le système a tendance à se « cisailer ».

## 2.2 Changement climatique et activité cyclonique

### 2.2.1 UNE DIFFICILE APPROCHE STATISTIQUE

Les climatologues disposent d'observations sur les cyclones tropicaux depuis la fin du XIXe siècle, surtout sur l'Atlantique. Les archives de l'ensemble des tempêtes dans l'Atlantique (de 1878 à nos jours) montrent une tendance à l'augmentation du nombre d'événements, qui est également corrélée avec la hausse des températures de surface. Cependant, la densité du trafic maritime en l'Atlantique était relativement faible au cours des premières décennies de cette période, de sorte qu'un nombre important de tempêtes n'ont probablement pas été observées directement par le réseau d'observation basé sur les navires. Lorsque l'on applique des mécanismes de corrections statistiques, on observe que la hausse du nombre d'épisode est très modérée et non significative d'un point de vue statistique. De plus, on note que la tendance à la hausse du nombre de tempêtes tropicales dans l'Atlantique est presque entièrement attribuable à l'augmentation des tempêtes de courte durée (<2 jours) seulement. De telles tempêtes de courte durée étaient particulièrement susceptibles d'avoir échappées au faible trafic maritime.

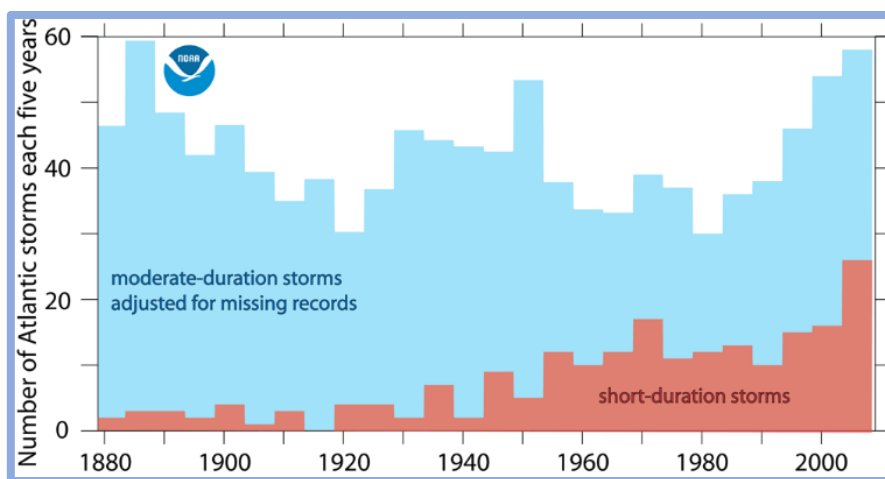


Figure 35 : Evolution statistique du nombre de tempêtes dans l'Atlantique (1)

Les tempêtes tropicales de l'Atlantique de plus de 2 jours n'ont pas augmenté en nombre. Les tempêtes de moins de deux jours ont fortement augmenté, mais cela est probablement dû à de meilleures observations.

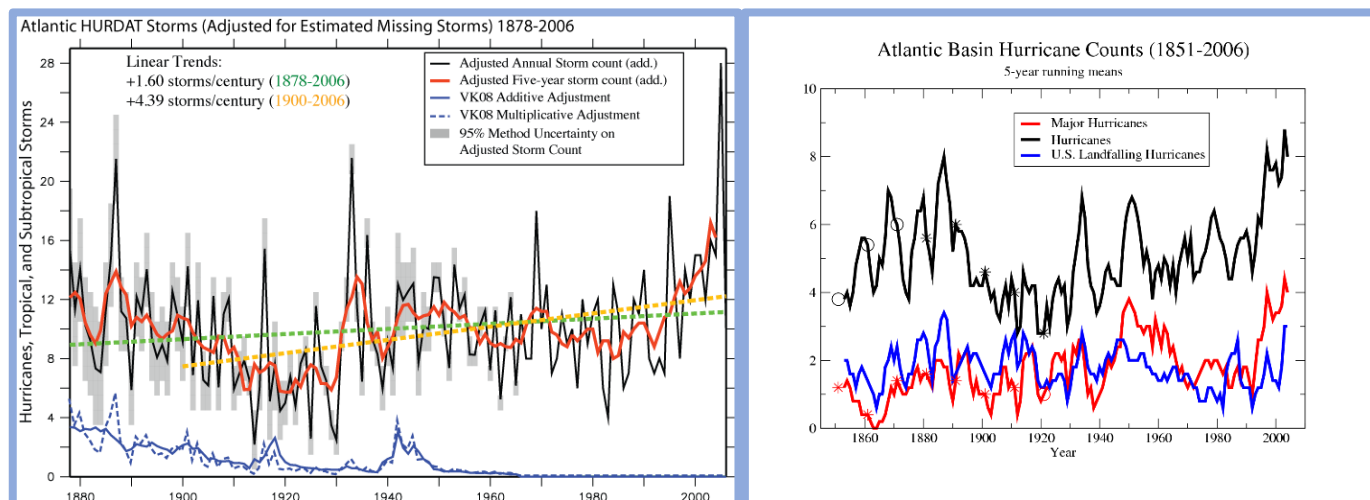


Figure 36 : Evolution statistique du nombre de tempêtes dans l'Atlantique (2)

Si l'on considère uniquement les cyclones, le résultat est similaire tout comme pour les cyclones qui ont touché terre aux États-Unis. Depuis les années 1970, la mise en place d'un réseau complet de satellites, scrutant la Terre en permanence, a permis de constituer une base de données homogène et précise. Grâce à ces observations satellitaires, les climatologues ont pu identifier des tendances fiables de l'activité cyclonique, de 1970 à nos jours. On observe une augmentation de l'activité des cyclones tropicaux dans l'Atlantique nord depuis les années 1970. Leur fréquence semble augmenter plus fortement dans les années 2000 et 2010. Mais sur l'Atlantique nord en particulier, l'activité cyclonique varie naturellement selon des cycles de plusieurs dizaines d'années. Avec un recul d'une cinquantaine d'années seulement, il est impossible de distinguer l'impact du changement climatique de la variabilité naturelle du phénomène de plus ces augmentations récentes ne sont pas représentatives du comportement observé au cours du siècle.

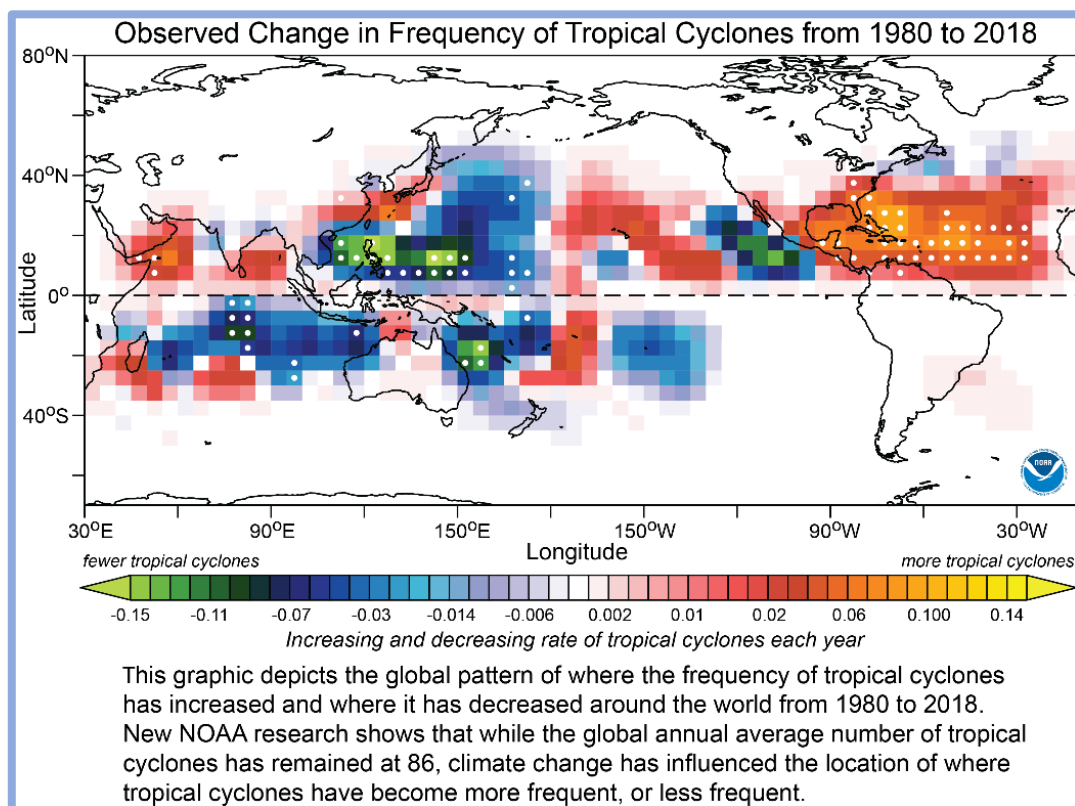


Figure 37 : Evolution de la fréquence des cyclones entre 1980 et 2018

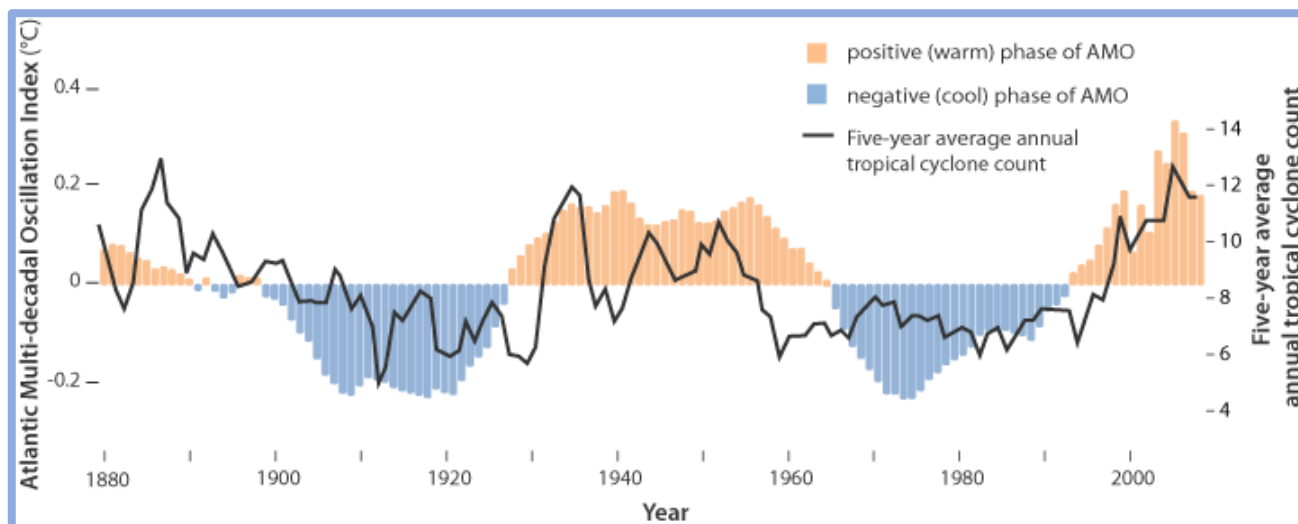


Figure 38 : L'indice d'oscillation multidécennale de l'Atlantique et le nombre moyen de cyclones tropicaux sur cinq ans

Avant le calcul de la moyenne, les dénombrements des tempêtes tropicales ont été ajustés pour omettre les tempêtes de courte durée et tenir compte des tempêtes qui ont probablement été manquées avant que la technologie satellitaire ne soit disponible

## 2.2.2 CYCLONE ET VARIABILITE INTERNE DU CLIMAT

Les impacts sur l'activité cyclonique d'El Niño et de son homologue La Niña sont opposés entre les océans Pacifique et Atlantique, renforçant l'activité des ouragans dans une région tout en l'affaiblissant dans l'autre.

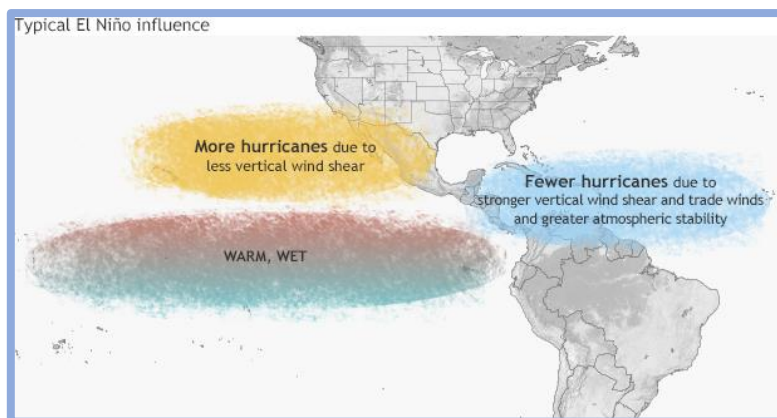


Figure 39 : Influence typique d'El Niño sur l'activité saisonnière des ouragans dans le Pacifique et l'Atlantique

El Niño favorise une activité plus forte des ouragans dans les bassins du Pacifique central et oriental et la supprime dans le bassin atlantique. Inversement, La Niña supprime l'activité des ouragans dans les bassins du Pacifique central et oriental et l'améliore dans le bassin atlantique

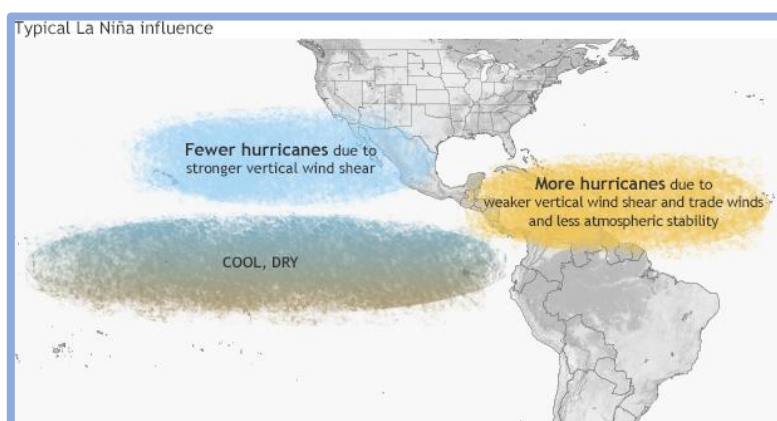


Figure 40 : Influence typique d'El Niño sur l'activité saisonnière des ouragans dans le Pacifique et l'Atlantique

Ces impacts sont principalement causés par des changements dans le cisaillement vertical du vent, qui fait référence au changement de vitesse et de direction du vent entre environ 1500 et 10000 mètres au-dessus du sol. Le cisaillement du vent est une différence de la vitesse ou de la direction du vent entre deux points suffisamment proches de l'atmosphère. Selon que les deux points de référence sont à des altitudes différentes ou à des coordonnées géographiques différentes, le cisaillement est dit vertical ou horizontal. Il provoque une instabilité qui se traduit par de fortes turbulences au niveau de la couche de friction.

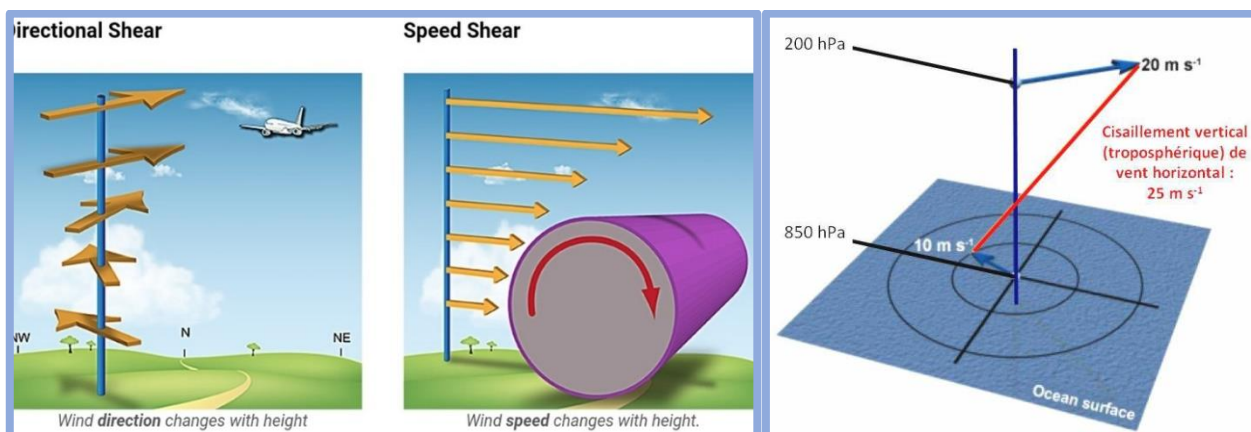


Figure 41 : Le cisaillement du vent

A gauche : Différents type de cisaillement du vent

A droite : exemple de calcul du cisaillement vertical du vent horizontal



Les cyclones tropicaux sont des moteurs thermiques dont la source chaude est la surface océanique tropicale et la source froide une tropopause tropicale très froide ; Les cyclones tropicaux nécessitent des cisaillements de vent verticaux faibles de façon que le cœur chaud puisse rester au-dessus du centre de la circulation altitude et permette un renforcement du cyclone. Un cisaillement de vent casse ce mécanisme, et les cyclones présentant un fort cisaillement de vent faiblissent rapidement, le centre de circulation en altitude se trouvant écarté du centre de circulation au sol.

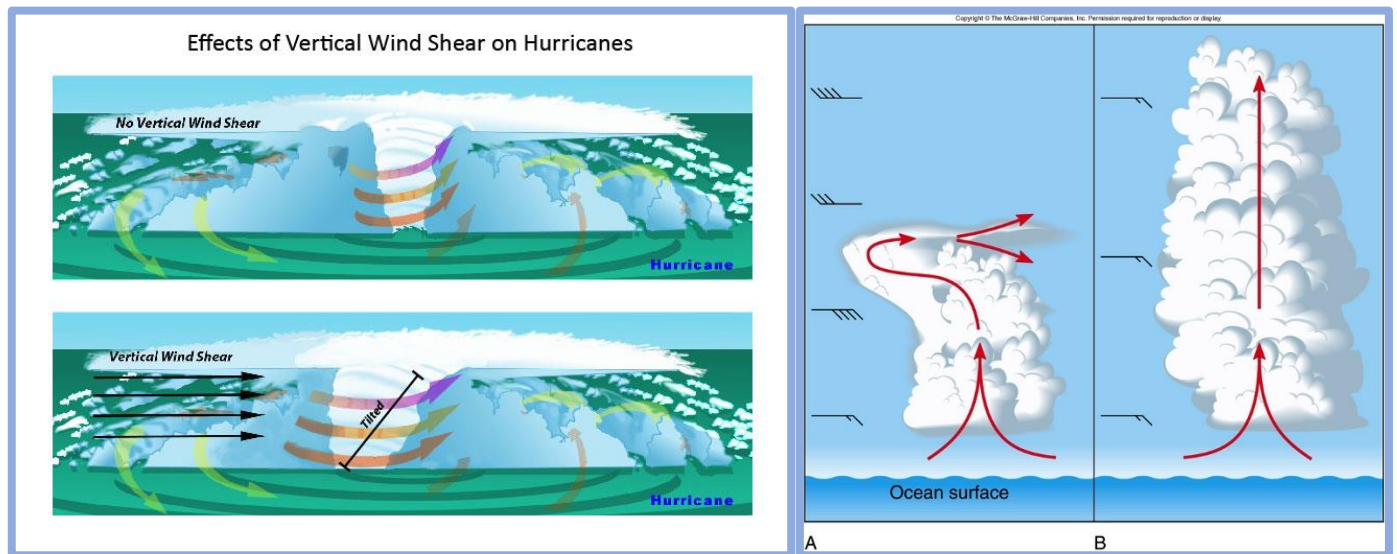


Figure 42 : Effets du cisaillement vertical sur la cyclogenèse

En présence d'un cisaillement vertical du vent, la structure centrale d'une tempête sera inclinée par rapport au cisaillement du vent. Cette inclinaison perturbera l'écoulement de la chaleur et de l'humidité, ce qui empêche la tempête de se développer et de devenir plus forte.

Pendant El Niño, la zone de convection tropicale du Pacifique et la circulation de Hadley associée s'étendent vers l'est à partir du Pacifique occidental, s'étendant parfois jusqu'à la côte ouest de l'Amérique du Sud. Dans le même temps, la circulation équatoriale de Walker est plus faible que la moyenne.

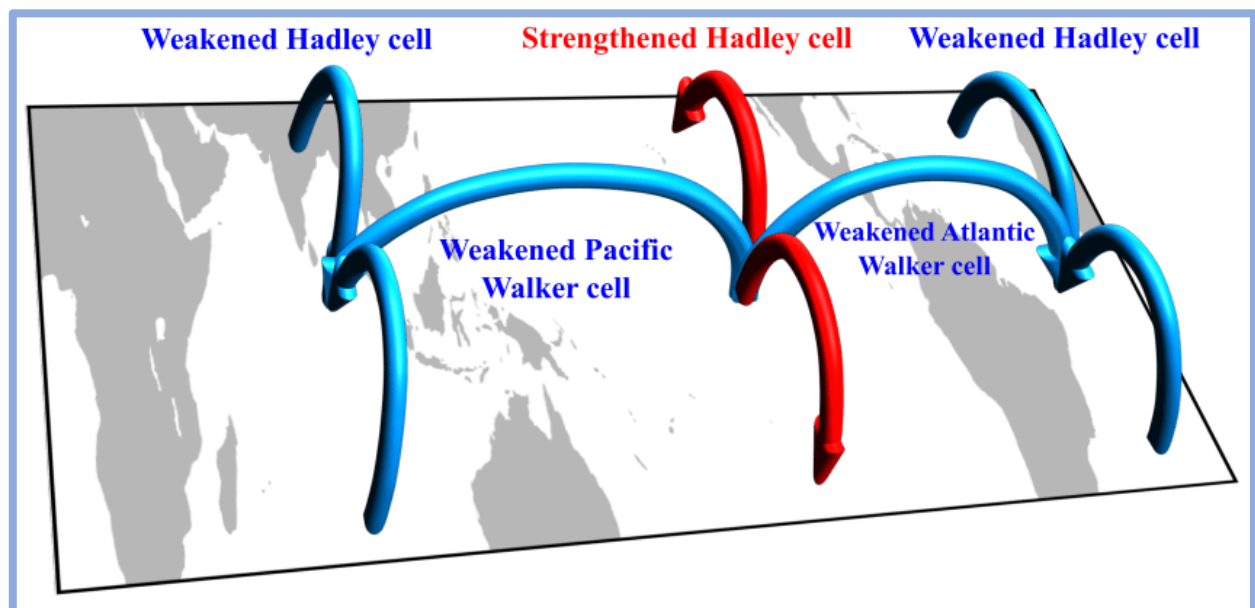


Figure 43 : Modification des circulations atmosphériques et épisode El Niño

Diagramme schématique des circulations modifiées de Walker et Hadley associées à un événement d'El Niño. Lorsqu'un El Niño se produit, les circulations des marcheurs du Pacifique et de l'Atlantique sont affaiblies. En outre, la circulation régionale de Hadley est renforcée au-dessus du Pacifique oriental mais affaiblie au-dessus de l'Atlantique et du Pacifique indo-occidental.

Ces conditions produisent des modifications de l'intensité et de la localisation des courants ascendants et descendants qui est associée à des vents plus faibles au niveau supérieur et à une réduction du cisaillement vertical du vent, ce qui favorise une plus grande activité des ouragans.

Au-dessus du bassin atlantique, la modification de la circulation de Walker est associée à des vents d'ouest plus forts au niveau supérieur et à des alizés plus forts au niveau inférieur à l'est, qui augmentent tous deux le cisaillement vertical du vent et suppriment l'activité des ouragans. En plus d'améliorer le cisaillement vertical du vent, El Niño supprime l'activité des ouragans dans l'Atlantique en augmentant la quantité de mouvement de descente et en augmentant la stabilité atmosphérique.

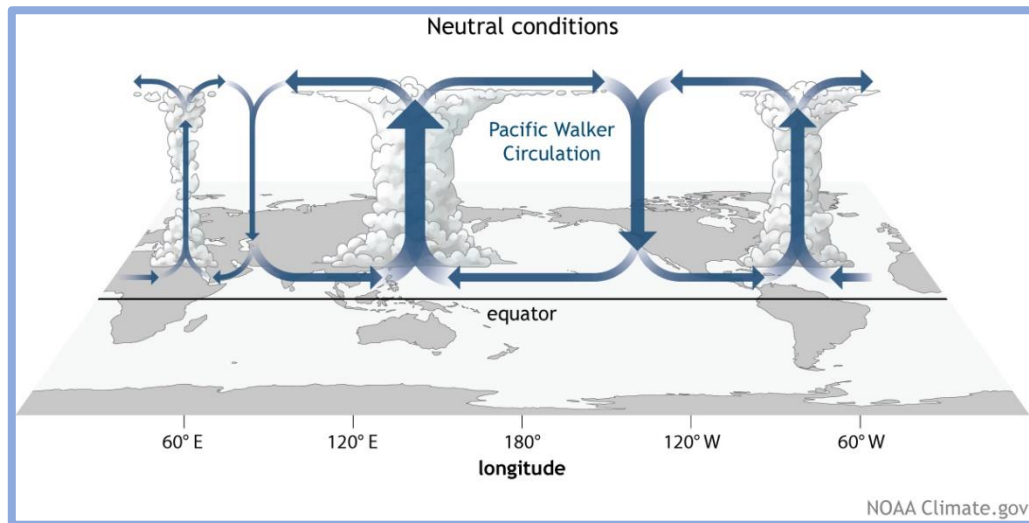


Figure 44 : Circulation de Walker durant une période neutre

La convection associée à la montée des branches de la circulation de Walker se trouve sur le continent maritime, le nord de l'Amérique du Sud et l'Afrique de l'Est.

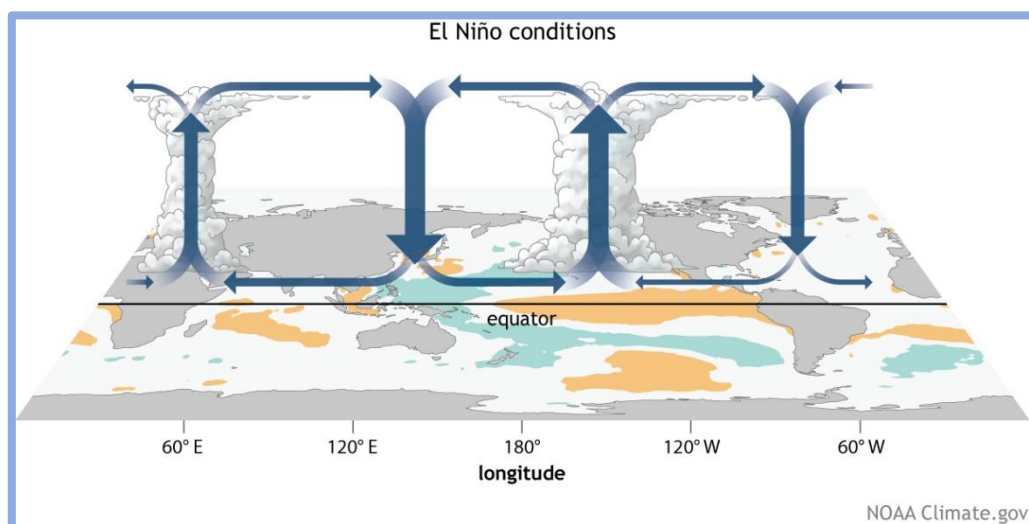
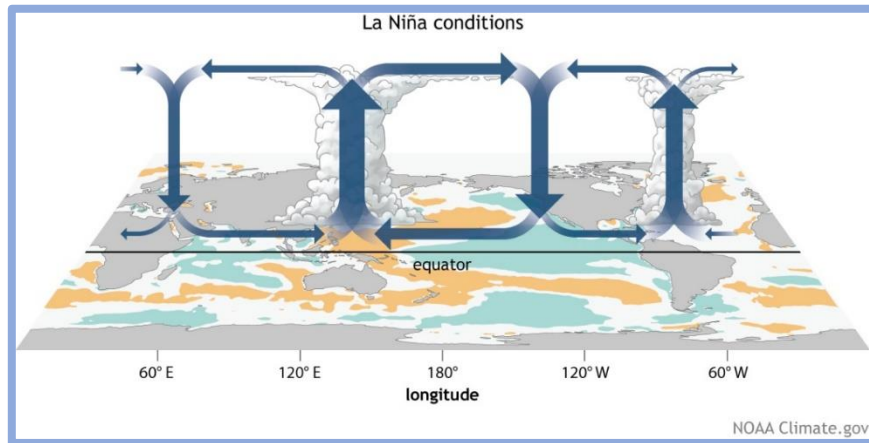


Figure 45 : Anomalie de la circulation de Walker (décembre-février) lors des épisodes El Niño, superposée sur la carte des anomalies moyennes de température de surface de la mer

Le réchauffement anormal de l'océan dans le Pacifique central et oriental (orange) aide à déplacer une branche montante de la circulation de Walker vers l'est de 180°, tandis que les branches qui descendante se déplacent vers le continent maritime et le nord de l'Amérique du Sud.

La Niña a des impacts opposés dans les bassins du Pacifique et de l'Atlantique. Pendant La Niña, la zone de convection tropicale et sa circulation d'Hadley sont repoussés vers l'ouest du Pacifique et l'Indonésie, et la circulation de Walker est amplifiée. La convection est généralement absente dans la moitié orientale du Pacifique équatorial. Dans la haute atmosphère, ces conditions produisent un creux au-dessus du Pacifique subtropical dans la région au nord de la convection supprimée, et une crête en aval au-dessus de la mer des Caraïbes et de l'Atlantique tropical occidental. Au-dessus du Pacifique subtropical central et oriental, le creux amplifié est associé à des vents plus forts à l'étage supérieur et à un cisaillement vertical plus fort du vent, qui suppriment l'activité des ouragans. Au-dessus du bassin atlantique, la crête anormale du niveau supérieur est associée à des vents plus faibles de niveau supérieur et inférieur, qui réduisent tous deux le cisaillement vertical du vent et l'augmentation de l'activité des ouragans. La

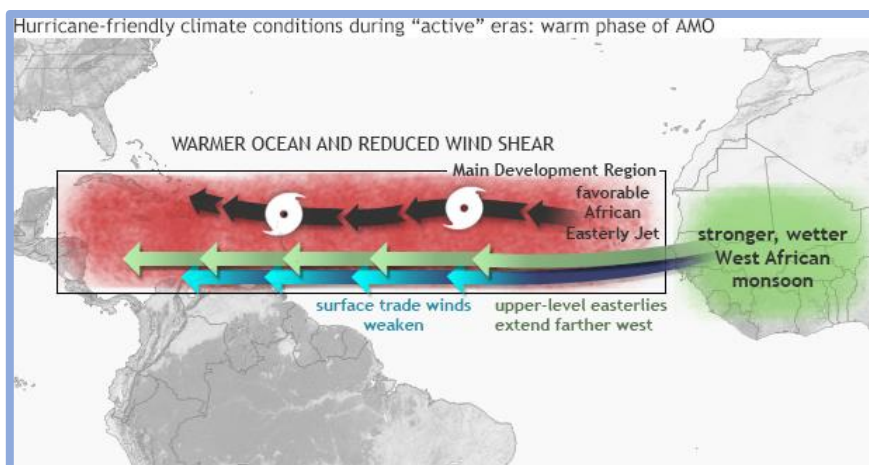
Niña favorise également l'augmentation de l'activité des ouragans dans l'Atlantique en diminuant la quantité de mouvement de descente et en diminuant la stabilité atmosphérique.



**Figure 46 : Anomalie de la circulation de Walker (décembre-février) lors des épisodes la Niña, superposée sur la carte des anomalies moyennes de température de surface de la mer**

Le refroidissement anormal des océans (bleu-vert) dans le centre et l'est de l'océan Pacifique et le réchauffement au-dessus de l'ouest de l'océan Pacifique renforcent la branche montante de la circulation Walker sur le continent maritime et la branche descendante au-dessus de l'est de l'océan Pacifique. On observe également une augmentation accrue du mouvement au-dessus du nord de l'Amérique du Sud, tandis que des mouvements anormaux de descente se trouvent au-dessus de l'Afrique de l'Est.

L'oscillation multidécennale de l'Atlantique (AMO) est un autre facteur climatique important pour influencer l'activité des ouragans de l'Atlantique. La phase chaude de l'AMO est associée à des périodes de forte activité pour les ouragans de l'Atlantique, comme c'est le cas depuis 1995. Inversement, la phase froide de l'AMO est associée à des périodes de faible activité (comme la période 1971-1994). La phase chaude de l'AMO reflète des températures de surface plus chaudes dans toute la région de développement principal de l'ouragan de l'Atlantique. Une caractéristique atmosphérique clé de ce modèle est une mousson ouest-africaine plus forte, qui produit une extension vers l'ouest des vents d'est de niveau supérieur (10000 mètres), ainsi que des alizés plus faibles vers l'est dans la basse atmosphère (1500 mètres).



**Figure 47 : Modèles climatiques associés à la phase chaude de l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (AMO).**

Cette configuration des vents est très propice à l'augmentation de l'activité des ouragans dans l'Atlantique, en partie parce qu'il entraîne un cisaillement vertical plus faible du vent. Les alizés plus faibles contribuent également à une structure plus propice du jet d'est africain (AEJ) de niveau intermédiaire (près de 3000 mètres), favorisant le développement des ouragans à partir des systèmes nuageux tropicaux se déplaçant vers l'ouest à partir de l'Afrique. Dans le même temps, ces régimes de vent sont associés à une poussée plus vers le nord de l'humidité tropicale profonde et de l'air instable, ce qui favorisent également des ouragans plus forts.

L'activité des ouragans au cours d'une saison donnée reflète souvent une combinaison des signaux multi décennaux et de l'ENSO. À une époque de forte activité dans l'Atlantique, El Niño se traduit généralement par une saison presque normale, et La Niña produit une saison au-dessus de la normale. Au cours d'une période de faible activité dans l'Atlantique, El Niño se traduit généralement par une saison inférieure à la normale et La Niña se traduit par



une saison presque normale. De même pour les bassins du Pacifique central et oriental, la combinaison d'une période de faible activité et d'El Niño produit souvent une saison presque normale, tandis que La Niña produit une saison inférieure à la normale. Pour une période de forte activité dans le Pacifique, El Niño produit souvent une saison supérieure à la normale, tandis que La Niña produit une saison presque normale.

### 2.2.3 DES CONSEQUENCES POSSIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ACTIVITE CYCLONIQUE

Des travaux récents montrent que la latitude à laquelle les cyclones ont atteint leur intensité maximale a migré vers les pôles au cours des 35 dernières années dans les deux hémisphères. Dans le bassin nord-ouest du Pacifique, il existe de nouvelles preuves d'un déplacement détectable vers le pôle dans la latitude d'intensité maximale des cyclones tropicaux, avec un lien provisoire avec le réchauffement anthropique. Cette constatation est cohérente avec l'expansion observée de la ceinture tropicale au cours de cette période. La ceinture tropicale est une zone, confinée de part et d'autre de l'Équateur par de larges zones désertiques, dans laquelle règne un climat chaud et humide. Son extension est déterminée par la circulation atmosphérique. Depuis quelques décennies, on constate que cette zone s'élargit en direction des pôles dans les 2 hémisphères. Plusieurs facteurs pourraient expliquer cette expansion (variabilité naturelle, ozone stratosphérique, réchauffement des températures de surface, changement dans le profil vertical des températures...)

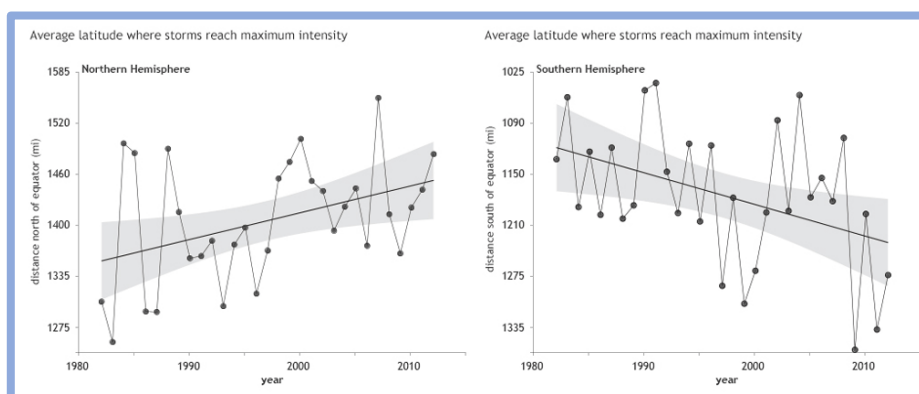


Figure 48 : Déplacement de la latitude où les cyclones atteignent leur intensité maximale

La latitude où les cyclones tropicaux atteignent leur force maximale s'est déplacée plus au nord de l'équateur dans l'hémisphère Nord (à gauche, l'ombrage gris montre une gamme d'incertitude) et plus au sud dans l'hémisphère Sud (à droite). NOAA Climate.gov/image, basée sur les données de Jim Kossi

L'intensité des cyclones tropicaux à l'échelle mondiale augmenteront probablement en moyenne (de 1 à 10 % selon les projections du modèle pour un réchauffement planétaire de 2 degrés Celsius). Ce changement impliquerait une augmentation encore plus importante en pourcentage du potentiel destructeur par tempête, en supposant qu'il n'y ait pas de réduction de la taille des tempêtes.

L'impact sur la taille des tempêtes du réchauffement anthropique est incertain. Les simulations effectuées par les modèles climatiques montrent une possible baisse de la fréquence des cyclones tropicaux sur l'ensemble de la planète mais les experts estiment que la proportion mondiale de cyclones tropicaux qui atteindront des niveaux très intenses (catégories 4 et 5) pourraient augmenter

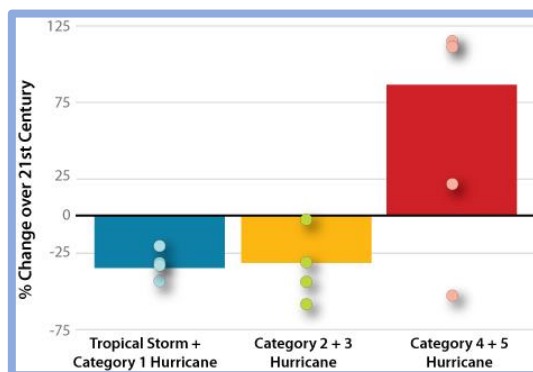


Figure 49 : Evolution de la fréquence des cyclones

Les modèles climatiques projettent qu'il y aura moins d'ouragans de l'Atlantique faibles à modérés à mesure que les températures de surface augmenteront ce siècle. Toutefois, les modèles prévoient qu'un plus grand nombre d'ouragans qui se forment auront tendance à se renforcer en ouragans de catégorie 4 et 5. Les barres de ce graphique montrent les résultats moyens de 18 modèles différents. Les points sur chaque barre montrent une gamme de résultats de 4 des 18 modèles différents., NOAA GFDL.

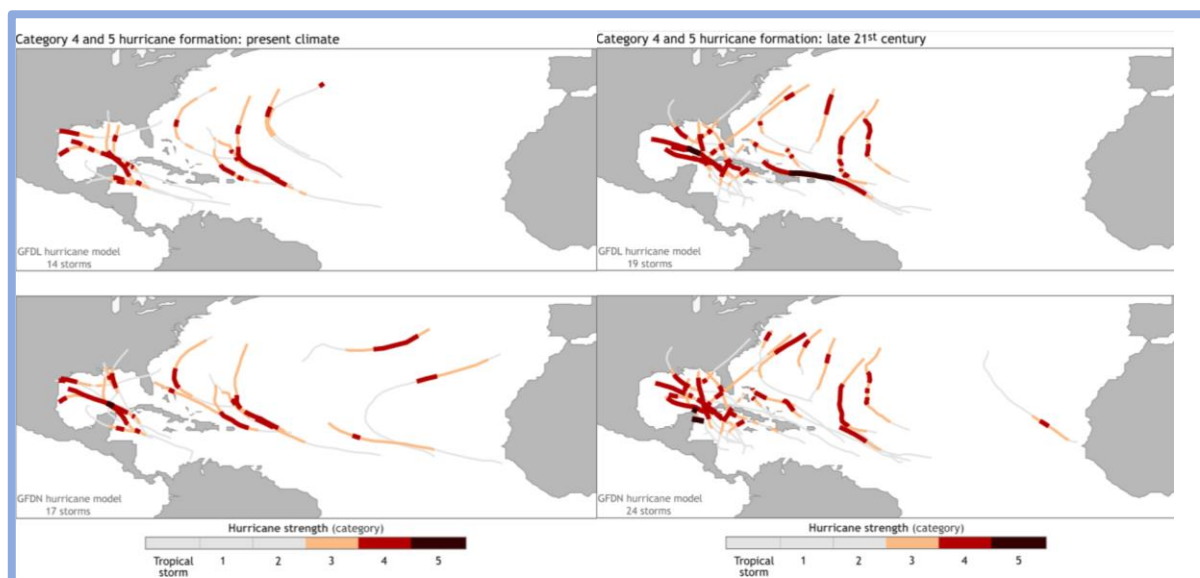


Figure 50 : Modélisation de l'évolution des cyclones de catégorie 4 et 5 pour l'Atlantique

Une étude sur l'intensification rapide des ouragans révèle que l'augmentation de l'intensification rapide de l'Atlantique (1982-2009) est très inhabituelle par rapport à la simulation par un modèle climatique de la variabilité interne multidécennale du climat, mais est conforme à la réponse à long terme attendue en réponse au forçage anthropique.

Les précipitations liées aux systèmes cycloniques devraient être également plus intenses. Une température de surface de l'océan plus élevée ne « facilite » en effet pas forcément la naissance de cyclones. Mais un cyclone déjà bien formé « puisera » bien plus d'énergie pour se renforcer dans une atmosphère humidifiée au-dessus d'océans réchauffés. En effet, la capacité de l'atmosphère à contenir de l'humidité augmente avec sa température. Ce supplément d'humidité sera à l'origine d'un renforcement des pluies cycloniques qui elles-mêmes intensifient le système. Les études de modélisation projettent en moyenne une augmentation de l'ordre de 10 à 15 % pour les taux de précipitations en moyenne à environ 100 km de la tempête pour un scénario de réchauffement planétaire de 2 degrés Celsius.

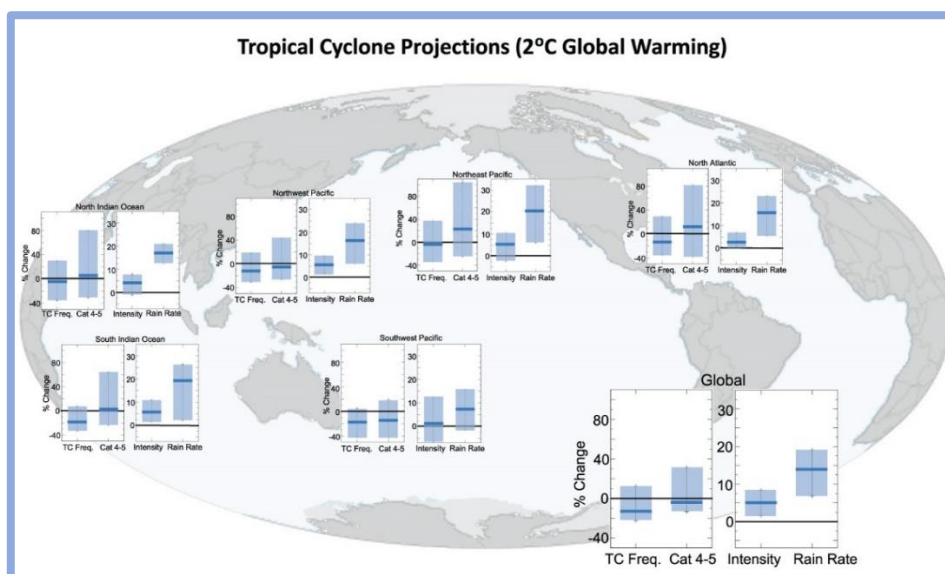


Figure 51 : Résumé des changements régionaux et mondiaux prévus pour les cyclones tropicaux (TC) en supposant un réchauffement planétaire de 2 °C

.Source : Knutson, T. et coll., 2020 : Tropical Cyclones and Climate Change Assessment.

Il existe des preuves d'un ralentissement de la vitesse de propagation des cyclones tropicaux au cours du siècle dernier, mais ces changements observés n'ont pas encore été liés avec confiance au changement climatique anthropique.

L'élévation du niveau de la mer devrait être à l'origine de niveaux d'inondation côtière plus élevés.

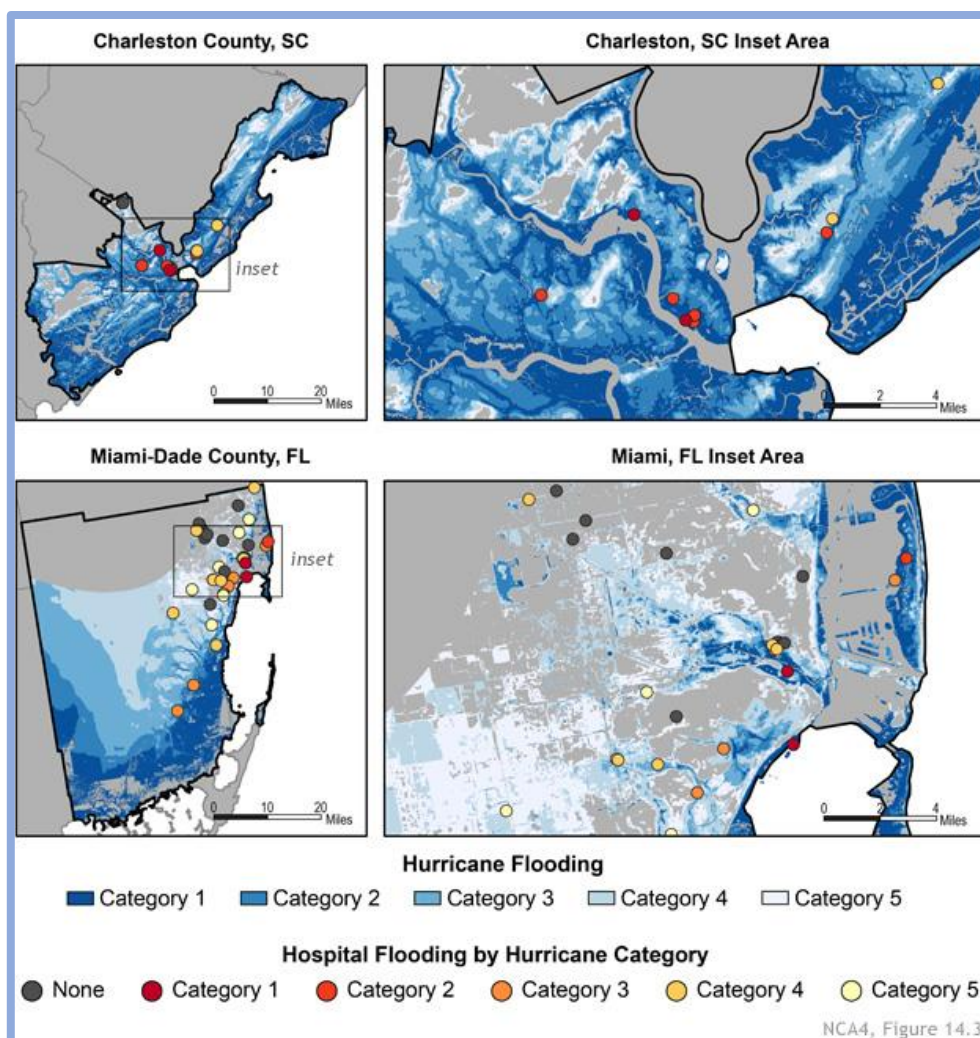


Figure 52 : Vulnérabilité des zones côtières et cyclones

Les vents violents constituent la manifestation la plus spectaculaire des cyclones, cependant, les inondations infligent généralement les pires dommages. Les ondes de tempête représentent les plus grands dangers pour les vies et les structures humaines, et dans les hôpitaux endommagés, les ondes de tempête peuvent menacer les deux à la fois. Ces cartes montrent des inondations potentielles causées par un cyclone dans le comté de Miami-Dade, en Floride et Charleston en Caroline du Sud. Les cartes montrent les inondations supposées dans les tons de bleu, des points indiquant l'emplacement des hôpitaux. L'inondation de l'hôpital apparaît dans des tons de jaune à rouge. Plus la couleur est foncée, plus la catégorie des ouragans est faible pour inonder l'hôpital et ses environs. Le comté de Miami-Dade possède 38 hôpitaux. Une tempête de catégorie 2 pourrait inonder quatre d'entre elles (11%), et un ouragan de catégorie 5 pourrait en inonder 26 (68 %). Pour les 11 hôpitaux de Charleston, la situation était pire. Une tempête de catégorie 2 pourrait inonder sept de ces hôpitaux (64 %), et une tempête de catégorie 5 pourrait inonder neuf d'entre eux (80%).

L'élévation du niveau de la mer fera en effet que les ondes de tempête des tempêtes tropicales se déplaceront plus loin à l'intérieur des terres que par le passé. Les répercussions combinées de l'élévation du niveau de la mer et de l'onde de tempête dans le Sud-Est peuvent coûter jusqu'à 60 milliards de dollars par année en 2050 et jusqu'à 99 milliards de dollars en 2090 dans un scénario (RCP8,5). Même dans un scénario inférieur (RCP4,5), les dommages prévus sont de 56 et 79 milliards de dollars en 2050 et 2090, respectivement.

## 2.2.4 DES MECANISMES POSSIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ACTIVITE CYCLONIQUE

Les relevés observés de l'activité des ouragans dans l'Atlantique montrent une certaine corrélation, sur des échelles de temps pluriannuelles, entre les températures locales de surface de la mer tropicale de l'Atlantique (SST) et l'indice de dissipation de puissance (PDI). Le PDI est une mesure globale de l'activité des ouragans dans l'Atlantique, combinant la fréquence, l'intensité et la durée des ouragans dans un seul indice.

Les températures de surface de (SST) de l'Atlantique et le PDI ont fortement augmenté depuis les années 1970, et certains éléments de preuve indiquent que les niveaux au cours des dernières années sont plus élevés que dans les années 1950 et 1960. Des études ont établi un lien entre l'augmentation des températures de surface dans la zone tropicale de l'Atlantique et l'augmentation des gaz à effet de serre, mais les liens proposés entre l'augmentation des gaz à effet de serre et le PDI ou la fréquence des ouragans ont été fondés sur des corrélations statistiques.



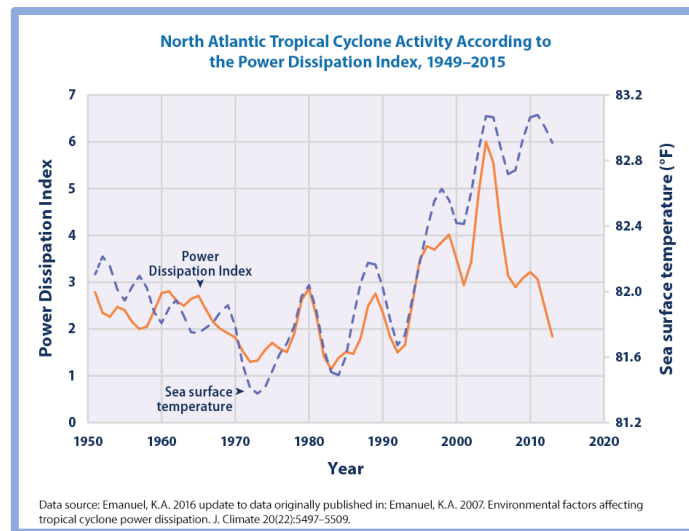


Figure 53 : Activité des cyclones tropicaux de l'Atlantique Nord Selon l'indice de dissipation de puissance, 1949-2015

L'indice de dissipation de puissance (PDI), explique la force, la durée et la fréquence des cyclones.

Si cette relation statistique entre les températures de surface de la zone tropicale de l'Atlantique et l'activité des ouragans est utilisée pour projeter les changements futurs de l'activité des ouragans dans l'Atlantique, les résultats sont inquiétantes car cela entraînerait des augmentations très substantielles du potentiel destructeur des ouragans, d'ici 2100. Cependant il a été observé que le PDI dans l'Atlantique est également bien corrélée au rapport entre la température de surface de l'ensemble de l'Atlantique par rapport aux températures de surface dans la zone tropicale de l'Atlantique. Il s'agit en fait d'une distinction cruciale, car si la relation statistique entre les ouragans de l'Atlantique et la température de surface dans la zone tropicale de l'Atlantique entraînerait une très forte augmentation de l'activité des ouragans dans l'Atlantique, la relation statistique alternative entre le PDI et la mesure relative du de la température de surface 1 n'impliquerait elle que de modestes variations au cours du XXIe siècle

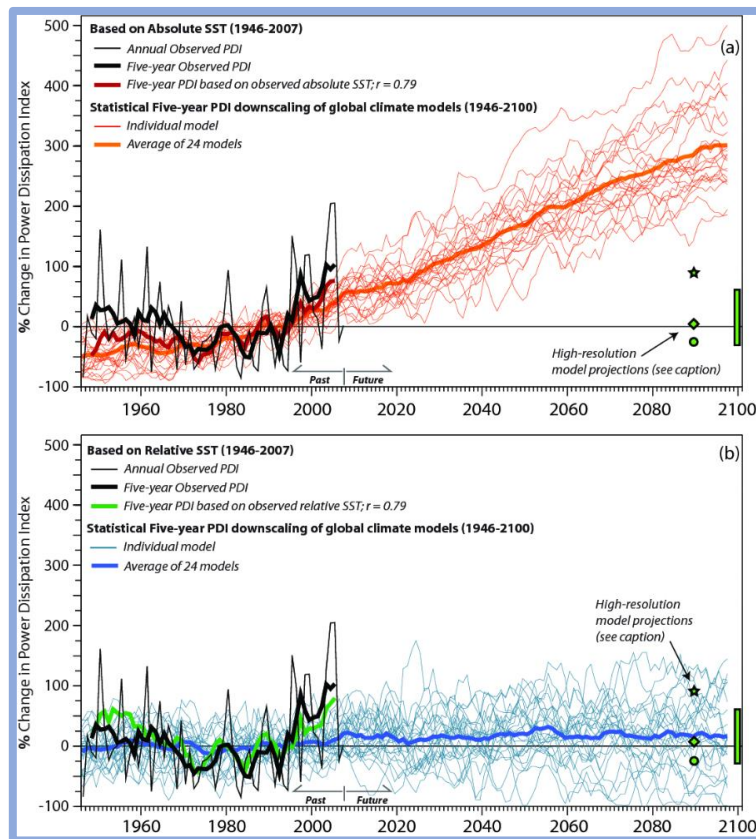


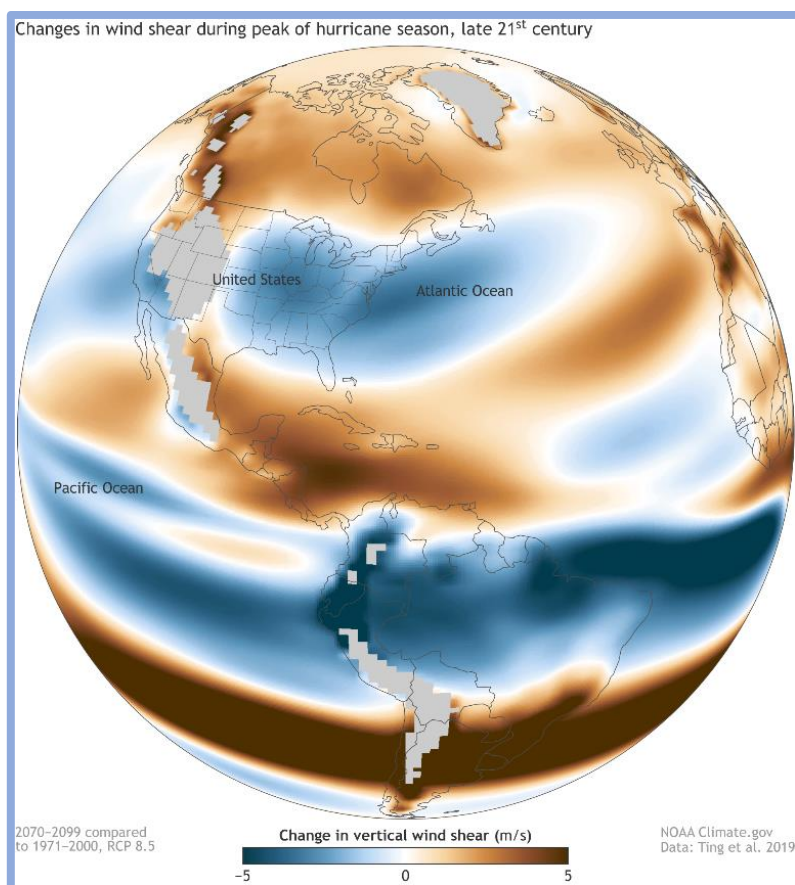
Figure 54 : Deux scénarii pour l'évolution cyclonique en lien avec les changements de température de surface de l'océan Atlantique

Sur la figure du haut, on considère une relation entre la température de surface dans la zone tropicale de l'Atlantique et l'indice synthétique PDI qui combine la fréquence, l'intensité et la durée des ouragans. L'élévation de la température de surface aux tropiques qui sera observé au cours du siècle aboutit à une significative élévation de cet indice.

Sur la figure du bas on considère cette fois une relation entre le rapport des températures de surface au tropique sur celle mesurées au sein de l'ensemble de cette océan et l'indice PDI. Dans ce cas, ce rapport évoluerait lui très peu au cours du siècle n'entraînant donc pas en conséquence de changement significatif de l'indice PDI

Si les modèles climatiques actuels suggèrent que les températures de surface de la zone tropicale de l'Atlantique se réchaufferont de façon spectaculaire au cours du 21<sup>ème</sup> siècle les températures troposphériques supérieures se réchaufferont encore plus. De plus, la plupart des modèles anticipent des niveaux croissants de cisaillement vertical du vent sur certaines parties de l'Atlantique tropical occidental or le réchauffement accru de la troposphère supérieure par rapport à la surface et l'augmentation du cisaillement vertical du vent sont des facteurs préjudiciables au développement et à l'intensification des ouragans.

Cependant de nouvelles simulations des futures saisons des ouragans dans l'Atlantique suggèrent que des émissions plus élevées de gaz à effet de serre réduiront le cisaillement vertical le long de la côte Est des États-Unis. Ce cisaillement agit comme un « ralentisseur » pour les ouragans qui arrivent à terre, ce qui les rend moins susceptibles de s'intensifier rapidement avant de débarquer. Lorsque les conditions dans la principale région de développement des ouragans sont particulièrement favorables à la formation d'ouragans, c'est-à-dire les températures chaudes et le cisaillement vertical du vent faible, les conditions sont à la fois moins favorables sur la côte Est. Mais cette protection intégrée pourrait s'éroder à l'avenir, ce qui rend la côte Est fortement peuplée plus vulnérable aux tempêtes qui s'intensifient rapidement à mesure qu'elles approchent de continent



**Figure 55 : Projection de l'évolution du cisaillement des vents**

La carte montre comment le cisaillement vertical du vent au plus fort de la saison des ouragans devrait changer d'ici la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle (2070-2099) par rapport à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle (1971-2000). Les endroits où le cisaillement vertical du vent projeté diminue sont de couleur bleue, tandis que les endroits où le cisaillement du vent devrait augmenter sont bruns. Ces simulations sont basées sur un scénario hypothétique d'émissions de gaz à effet de serre dans laquelle le dioxyde de carbone et d'autres émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter à un rythme relativement élevé au cours des prochaines décennies. Une vaste zone bleue dans l'est des États-Unis indique que la région devrait connaître une diminution du cisaillement vertical du vent pendant la haute saison des ouragans (août-octobre) d'ici la fin du siècle. Au moins 75 % des simulations de modèles dans ce domaine étaient d'accord pour dire que le cisaillement du vent diminuerait, ce qui indique une grande confiance dans le changement. (Les emplacements exacts des zones de transition entre les zones de cisaillement croissant et décroissant sont plus incertains.)

Étant donné que l'eau chaude est le carburant qui alimente les ouragans, on s'attend déjà à ce que la hausse des températures océaniques augmente l'intensité potentielle maximale des tempêtes futures ceci conjuguée à l'environnement de cisaillement du vent plus favorable à l'intensification des ouragans dans ce pays, donne à penser que les ouragans qui se dirigent vers la côte Est des États-Unis auront de meilleures chances d'atteindre une intensité potentielle maximale à l'avenir.

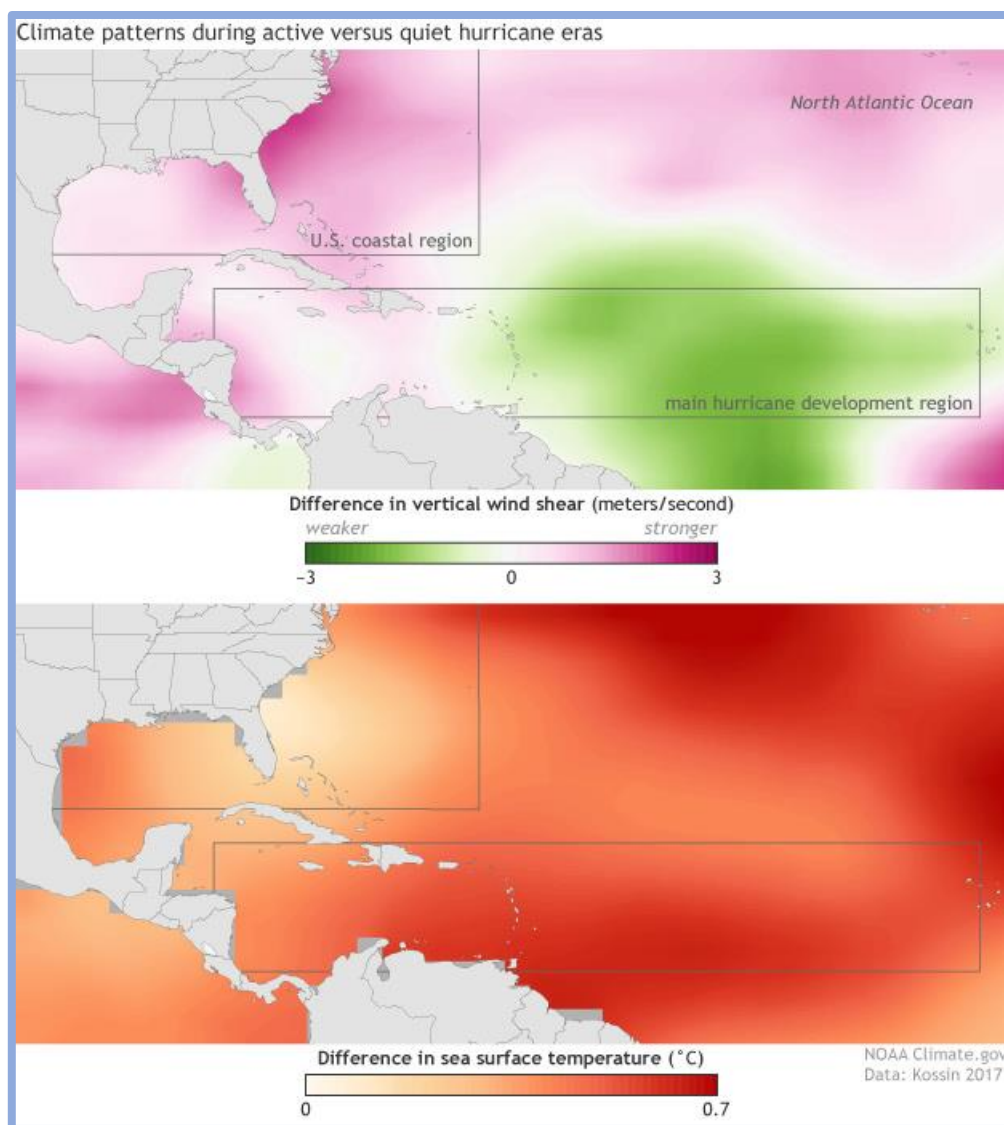


Figure 56 : Evolution des conditions d'intensification des océans au large de la côte Est des USA

Ces cartes montrent la différence entre le cisaillement vertical du vent (en haut) et la température de surface de la mer (en bas) entre la période actuelle des ouragans actifs (1993-2015) et la période précédente (1970-1992). Dans la majeure partie de l'Atlantique tropical (où les ouragans se forment), les conditions climatiques moyennes depuis le milieu des années 1990 ont été particulièrement favorables aux ouragans, avec des températures de surface de l'océan plus élevées (rouges plus foncés) et un cisaillement vertical du vent (verts) plus faible. Mais au-dessus du golfe du Mexique et au large de la côte sud-est des États-Unis, la tendance est inversée : températures plus fraîches (par rapport à la principale région de développement) et cisaillement vertical plus fort du vent, qui affaiblissent tous deux les ouragans.

### 2.3 2020 : Une année cyclonique exceptionnelle

La saison officielle des ouragans dans le bassin atlantique (océan Atlantique Nord, mer des Caraïbes et golfe du Mexique) commence officiellement le 1<sup>er</sup> juin et se termine le 30 novembre et l'activité la plus forte se fait de la mi-août à la fin octobre. En moyenne, 12 « tempêtes nommées » (tempêtes tropicales ou force plus élevée) se produisent chaque saison, avec une moyenne de 6 ouragans et 3 ouragans majeurs.

Basin	Tropical Storm or stronger (Vmax≥63km/h)	Hurricane/ Typhoon/Cyclone (Vmax≥119km/h)
NW Pacific	26.0	16.5
NE/Central Pacific	16.6	8.9
Atlantic	12.1	6.4
Aus SW Pacific	9.9	5.2
SW Indian	9.3	5.0
Aus SE Indian	7.5	3.6
N Indian	4.8	1.5
Average TC number by basin (source: NOAA)s.		

Figure 57 : Statistiques sur la fréquence des cyclones par bassin cyclonique



La saison des ouragans dans l'Atlantique en 2020 a été une saison exceptionnelle. De nombreux records ont été battus cette année :

- 30 Tempêtes nommées se sont formées au cours de la saison (précédent record : 27 en 2005 compte tenu uniquement des tempêtes nommées, 28 compte tenu de tous les systèmes qui ont atteint au moins les tempêtes tropicales/subtropicales). Ce n'est que pour les saisons 2005 et 2020 que l'alphabet grec a été introduit, depuis la liste prédéterminée de nom qui ne comprend que 21 noms
- 5 Tempêtes nommées en juillet (précédent record en 2005, généralement seulement 1-2 tempêtes nommées formées avant août).
- 10 tempêtes nommées en septembre (record pour n'importe quel mois, généralement 4 tempêtes nommées formées en septembre).
- 12 Tempêtes nommées ont touché terre aux États-Unis (précédent record : 9 en 1916), dont 5 dans l'État de Louisiane, l'ouragan LAURA ayant été l'événement le plus dévastateur.
- Activité extrêmement active en novembre : 3 tempêtes nommées (ETA, IOTA, THETA), dont deux ouragans majeurs (ETA & IOTA), l'IOTA devenant le dernier ouragan de catégorie 5 jamais enregistré dans le bassin de l'Atlantique Nord (climatologie de 30 ans 1981-2010 : 1 ouragan majeur tous les 7-8 ans).

Il convient de noter que cette saison a été plus longue que la moyenne avec de nombreux événements d'intensification rapide, et l'énergie cyclonique accumulée par l'ACE, qui mesure la force/durée des tempêtes tropicales/ouragans, de la saison des ouragans de l'Atlantique 2020 a été de 75 % supérieure à la moyenne à long terme

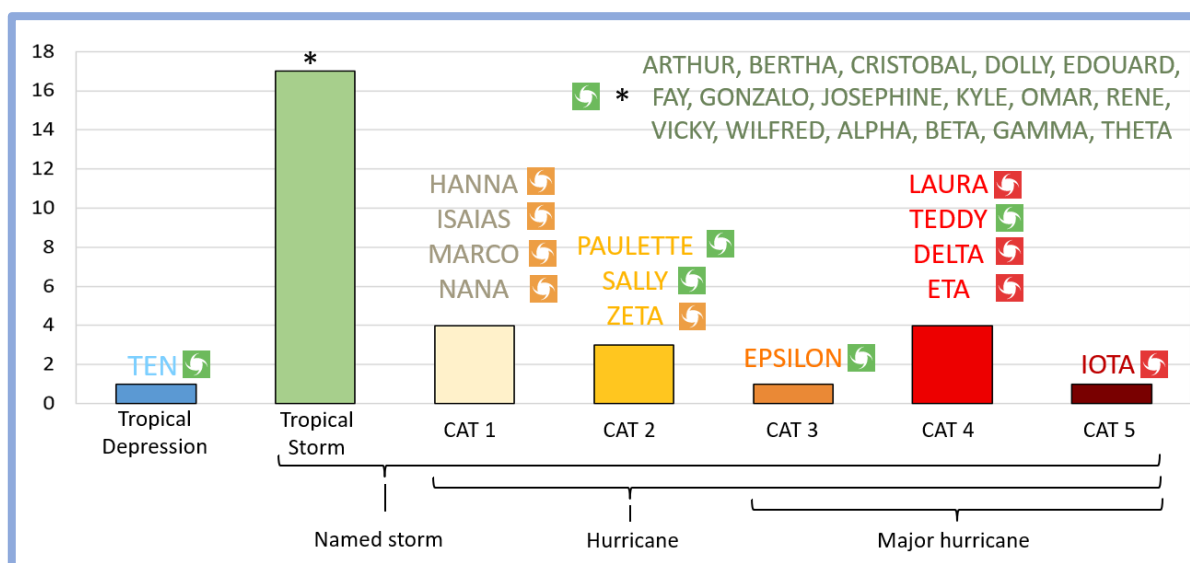


Figure 58 : Recensement des événements cycloniques en 2020 pour l'Atlantique (1)

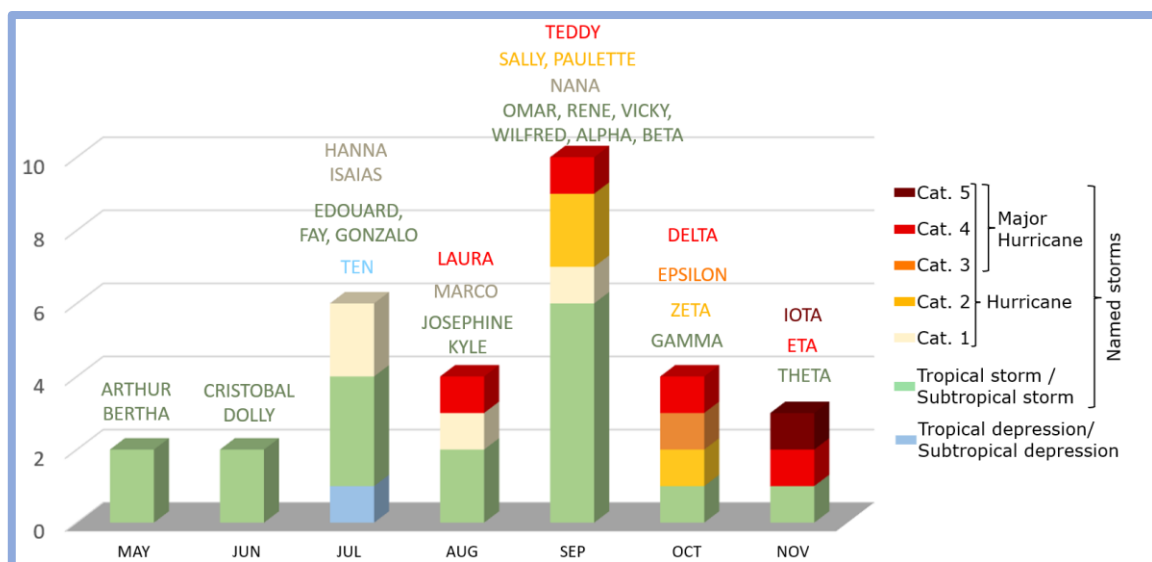


Figure 59 : Recensement des événements cycloniques en 2020 pour l'Atlantique (2)

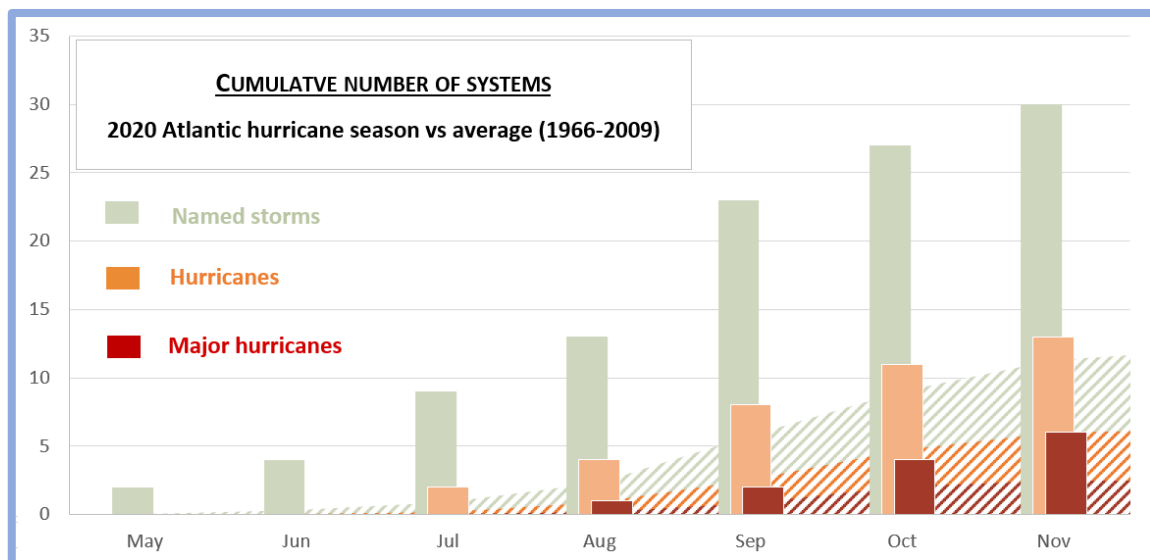


Figure 60 : Recensement des événements cycloniques en 2020 pour l'Atlantique (3)

La dernière saison cyclonique extrêmement active fut en 2005 dans l'Atlantique qui a connu 28 « tempêtes » (27 tempêtes tropicales et une tempête subtropicale) avec 15 ouragans (dont 7 ouragans majeurs), battant l'ancien record de 21 en 1933 (données disponibles depuis 1851).

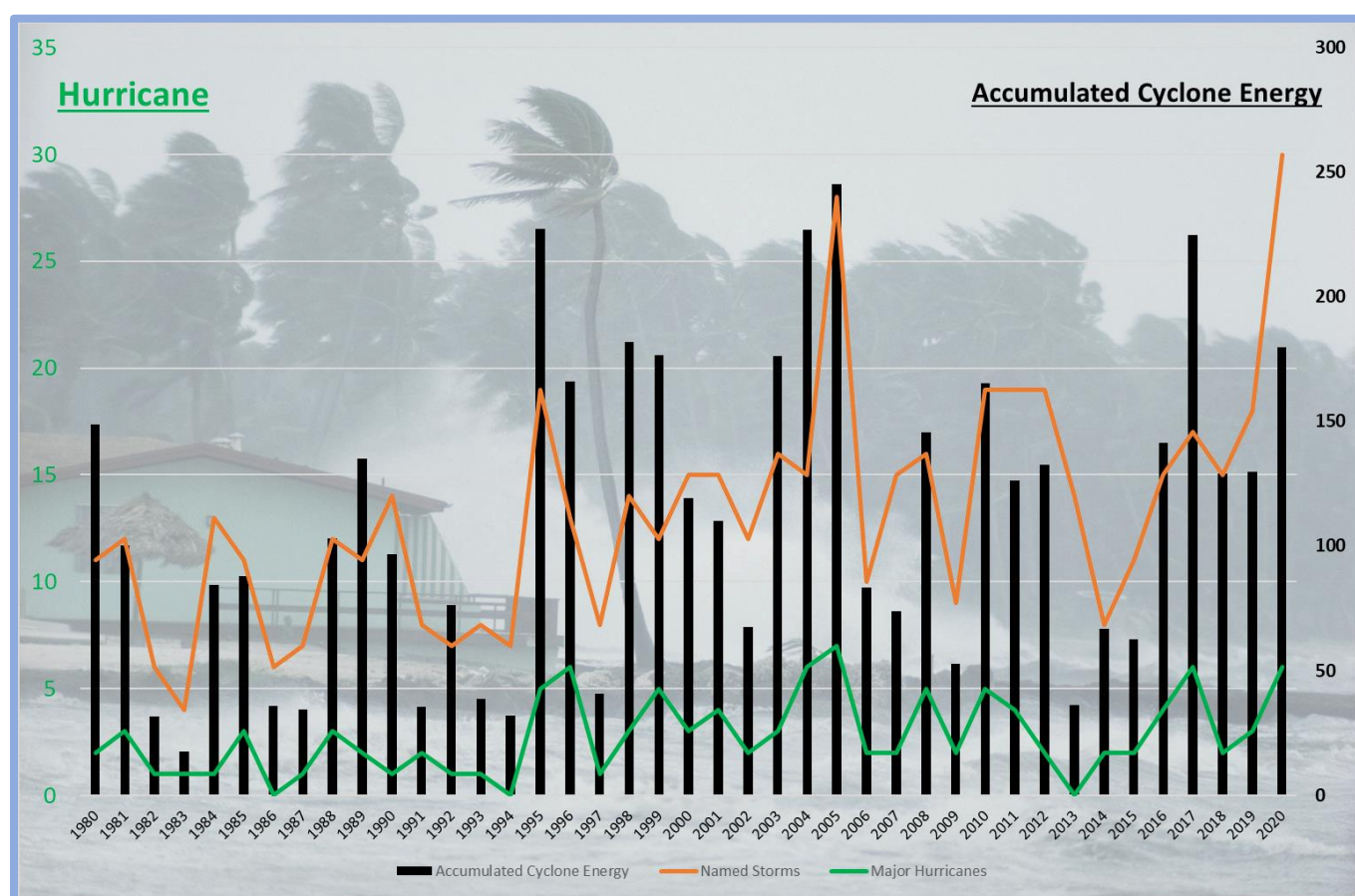


Figure 61 : Nombre de cyclones, de cyclones majeurs et énergie cumulative des cyclone (ACE) dans l'Atlantique entre 1980 et 2020

L'énergie cumulative des cyclones tropicaux (en anglais Accumulated cyclone energy ou ACE) est la quantité d'énergie globale d'un ou de plusieurs cyclones estimée à partir de la vitesse maximale des vents pour chaque période de six heures. Selon sa définition, elle n'est calculée qu'à partir du moment où le système atteint le niveau de tempête tropicale et ne tient donc pas compte des dépressions tropicales plus faibles et souvent de courte durée de vie. Cette quantité est un index de mesure utilisé par le National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis pour quantifier l'énergie des cyclones tropicaux comme les ouragans et les typhons. L'indice total d'un cyclone ou de tous les systèmes tropicaux d'une saison dans un bassin océanique peut ainsi être évalué et comparé à d'autres cyclones ou saisons.

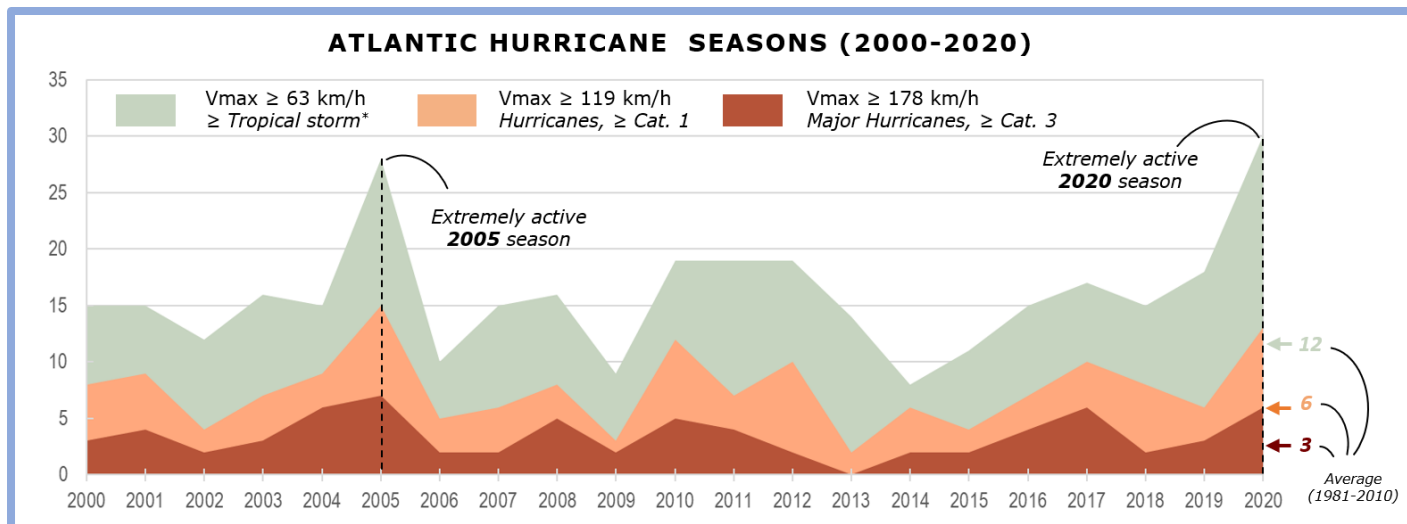


Figure 62 : Statistiques cycloniques en Atlantique

La saison 2020 est la cinquième saison cyclonique consécutive dans l'Atlantique au-dessus de la moyenne, tandis que la saison 2015 a été inférieure à la moyenne, également en raison des fortes conditions d'El Niño, qui ont réduit le nombre d'événements dans ce bassin. Cette augmentation de l'activité des ouragans est attribuée à la phase chaude de l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (AMO) – qui a débuté en 1995 – et a favorisé des tempêtes plus fortes et plus longues. Ces périodes actives pour les ouragans de l'Atlantique ont historiquement duré environ 25 à 40 ans. L'ensemble des conditions atmosphériques et océaniques liées à l'AMO chaude était de nouveau présent en 2020. Il s'agissait notamment de températures de surface de la mer de l'Atlantique plus chaudes que la moyenne et d'une mousson ouest-africaine plus forte, ainsi que de vents verticaux beaucoup plus faibles et de vents au large de l'Afrique qui étaient plus favorables au développement des tempêtes. Ces conditions, combinées à la Niña qui s'est développée dans le Pacifique tropical en août-septembre (pic de la saison des ouragans dans l'Atlantique : août-octobre), ont contribué à rendre possible cette saison des ouragans extrêmement active.

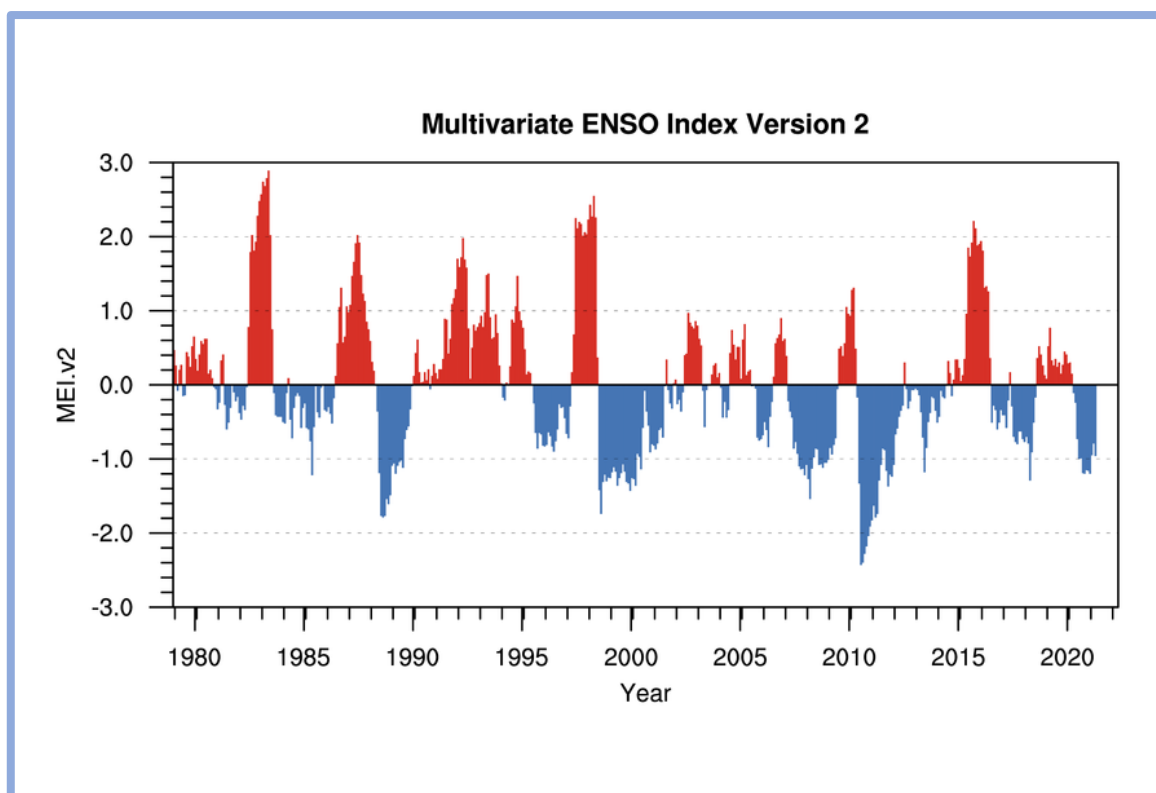


Figure 63 : Index ENSO

Les valeurs supérieures à 1 correspondent à des épisodes El Niño, les valeurs inférieures à -1 correspondent à des épisodes la Niña.



## PARTIE 2 : L'APPORT DU SPATIAL

### 1. ETUDIER LA CRYOSPHERE DEPUIS L'ESPACE

Avec les satellites modernes, les scientifiques peuvent mesurer et surveiller les gains et les pertes de masse de la cryosphère avec une précision sans cesse croissante. Une mesure clé pour évaluer la santé des réservoirs de glace est la hauteur de la glace, que les scientifiques utilisent pour calculer les changements de masse au fil du temps. Les chercheurs combinent des mesures de la hauteur de glace avec d'autres observations pour déterminer l'épaisseur et le volume d'un morceau de glace, qui est ensuite converti en masse. Les scientifiques peuvent utiliser des altimètres radar et laser pour mesurer les changements à l'élévation de la glace. Ces instruments de télédétection fonctionnent en envoyant des impulsions de lumière radio ou laser vers la surface de la Terre et en enregistrant les reflets au fur et à mesure qu'ils rebondissent. En mesurant le temps entre le signal sortant et le signal de retour, et en connaissant l'altitude précise du satellite au-dessus du sol, les scientifiques peuvent calculer l'élévation de la surface de la glace. Ensuite, en comparant plusieurs passages d'altimètres sur des mois et des années, ils peuvent déduire des changements de surface au fil du temps.

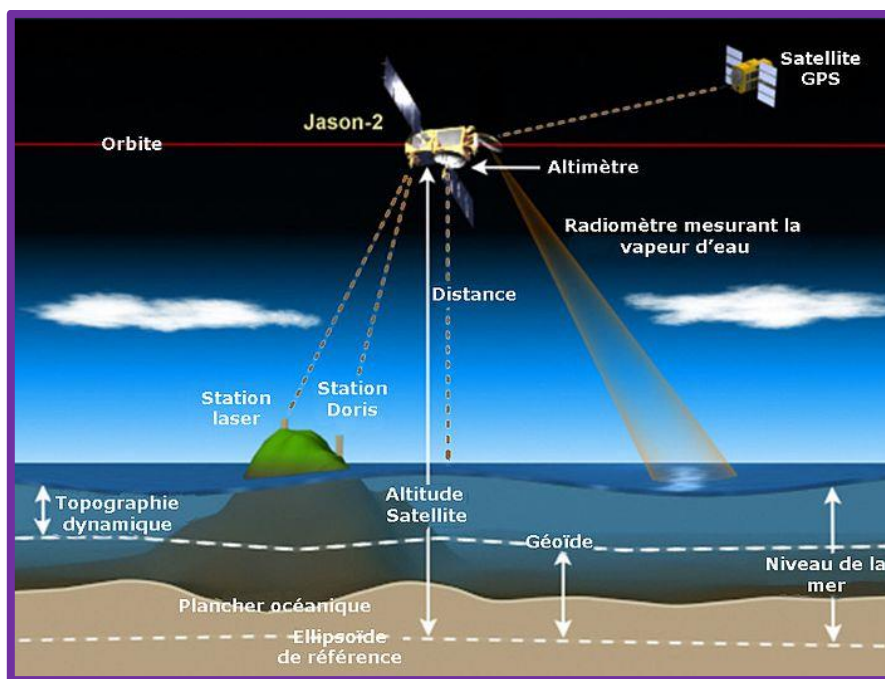


Figure 64 : Principe de l'altimétrie spatiale

Bien que les altimètres radar et laser utilisent une méthodologie similaire, les deux fonctionnent à des fréquences différentes et retournent des informations différentes. Les altimètres radar utilisent des fréquences micro-ondes qui couvrent de larges bandes sur les calottes glaciaires. Les instruments peuvent « voir » la surface dans toutes les conditions atmosphériques, indépendamment des nuages, et les signaux peuvent pénétrer dans la neige pour voir les couches de glace. Les lasers utilisent des longueurs d'onde plus courtes qui sont concentrées en faisceaux très étroits ; ils observent de plus petites plaques de la surface. Les lasers ne peuvent pas pénétrer dans les nuages épais, et leurs signaux se reflètent sur le dessus de la couche de neige. Les deux types de mesures sont complémentaires. Les radars peuvent observer plus de surface de glace avec une plus grande fréquence, mais avec moins de précision. Les altimètres laser peuvent retourner des données plus précises sur la surface de la glace, en particulier sur les zones en pente raide, mais ils observent moins souvent les mêmes bandes. Depuis 1991, les altimètres radar ont fourni des données continues sur l'élévation des glaces pour le Groenland et l'Antarctique.

Depuis juillet 2020, CryoSat-2 de l'ESA et ICESat-2 de la NASA volent sur des orbites qui se chevauchent périodiquement afin de permettre des observations simultanées de radars et de lasers. Ces vols synchronisés permettront aux scientifiques de faire de meilleures mesures de l'épaisseur de la glace de mer. ICESat-2 recueille suffisamment de données pour estimer le changement annuel de hauteur des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique à moins de 4 millimètres.

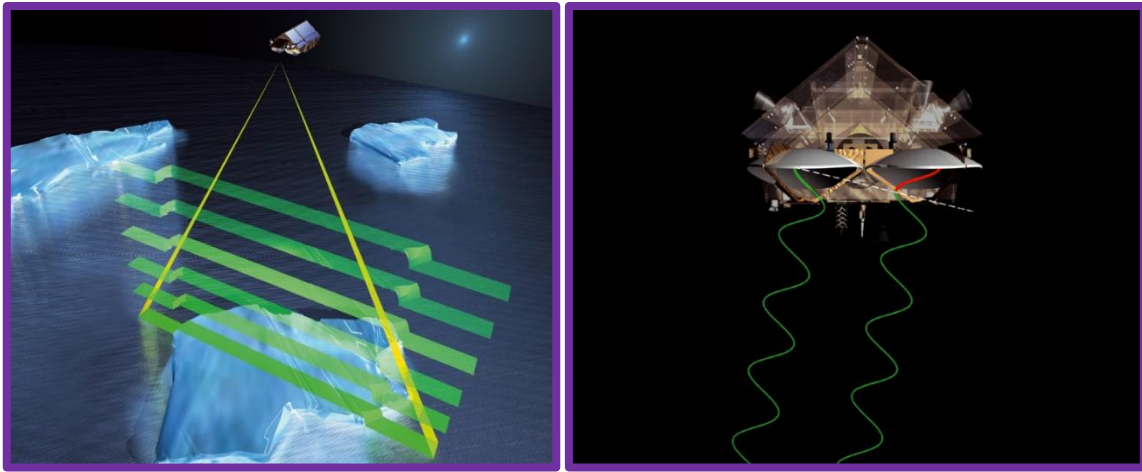


Figure 65: Altimétrie radar du satellite Cryosat-2

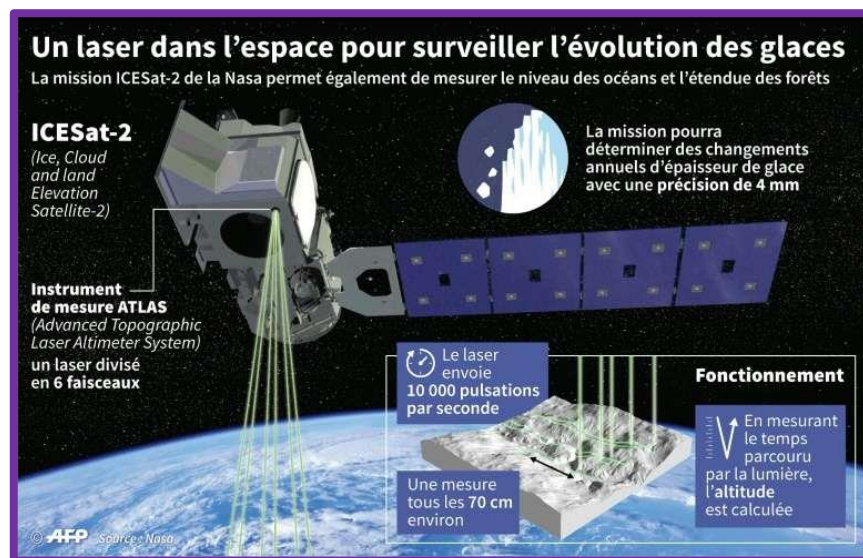


Figure 66 : Altimétrie laser du satellite Icesat-2

Les scientifiques travaillent actuellement à la construction de meilleurs modèles d'équilibre de la masse de glace en combinant les observations de Cryosat-2 et d'ICESat-2 avec celles des satellites Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). GRACE et GRACE-FO (GRACE-Follow on) sont deux missions spatiales similaires, de la NASA et de l'agence spatiale allemande (DLR), lancées respectivement en mars 2002 et mai 2018. Toutes deux effectuent des mesures détaillées de la gravité terrestre. Les données recueillies permettent de connaître la répartition détaillée des masses au sein de la planète et ses variations dans le temps. GRACE utilise un système de mesure de distance reposant sur des émissions micro-ondes qui mesure les variations de vitesse et de distance entre deux satellites identiques volant sur la même orbite polaire à une distance de 220 km l'un de l'autre et à 500 km au-dessus du sol terrestre. Le système de mesure est si sensible qu'il peut détecter des changements de distance de 10 microns.



Figure 67 : Le champ gravitationnel de la Terre (avec exagération verticale), également connu sous le nom de « pomme de terre gravitationnel de Potsdam »

Lorsque les deux satellites GRACE effectuent leurs 16 révolutions quotidiennes autour de la Terre, leur trajectoire est perturbée par les variations du champ gravitationnel terrestre. Lorsque le premier satellite passe au-dessus d'une région où la gravité est un petit peu plus importante, le satellite est attiré par l'anomalie du champ gravitationnel et la distance avec le satellite qui le suit est modifiée. Après avoir franchi l'anomalie, le premier satellite reprend sa vitesse normale tandis que les paramètres de la trajectoire du deuxième satellite sont à leur tour affectés. En mesurant de manière continue les modifications de distance entre les deux satellites et en combinant ces informations avec la position des satellites fournie par des récepteurs GPS, les scientifiques peuvent reconstituer une carte détaillée du champ gravitationnel terrestre. Les deux satellites maintiennent en permanence une liaison montante et descendante entre eux. La mesure de distance est effectuée en comparant le décalage de fréquence au niveau de cette liaison. Pour compléter ces données, les vaisseaux mesurent leurs propres mouvements en utilisant des accéléromètres. Toutes ces informations sont envoyées aux stations au sol. Pour fournir des points de référence et maintenir l'orientation des vaisseaux, ceux-ci utilisent des capteurs d'étoile des magnétomètres et des récepteurs GPS. Les satellites GRACE ont également des réflecteurs laser qui permettent de mesurer la distance depuis la station au sol par laser.

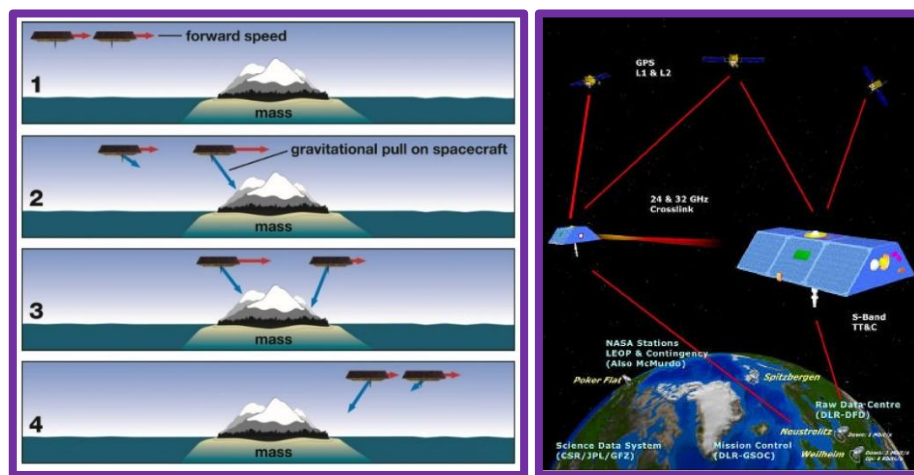


Figure 68 : Comment GRACE mesure la gravité

Lorsque les deux engins spatiaux sont au-dessus de l'océan, la distance entre eux est relativement constante. Lorsque le satellite de tête rencontre la terre ferme, la gravité plus élevée de la terre l'éloigne satellite de queue, qui est encore au-dessus de l'eau. Une fois que le deuxième satellite rencontre également la terre ferme, il est lui aussi tiré vers la masse supérieure et, par conséquent, vers le satellite de tête. Au fur et à mesure que le satellite de tête passe devant la masse terrestre plus dense, il est légèrement tiré vers l'arrière par la gravité plus élevée de la terre. Lorsque les deux engins spatiaux sont de nouveau au-dessus de l'eau, le vaisseau spatial qui suit est ralenti par la terre ferme avant de revenir à sa distance initiale derrière le vaisseau spatial de tête.

Les scientifiques utilisent également la hauteur des glaces dans des modèles pour déduire la façon dont les calottes glaciaires pourraient changer à l'avenir, comme dans le projet l'inlandsis (ISMIP6) qui rassemble des groupes de modélisation des calottes glaciaires à travers le monde. Alors que la glace de la Terre ne cesse de diminuer, les scientifiques tentent de comprendre l'emplacement exact et le rythme des changements. La carte ci-dessous montre l'évolution de l'épaisseur de la glace terrestre en Antarctique entre 2003-2009 et 2018-2019, mesurée par ICESat et ICESat-2. (Des mesures similaires ont également été cartographiées pour le Groenland).

Dans une étude publiée en juin 2020, les scientifiques ont constaté que les pertes de glace autour des bords du Groenland et de l'Antarctique occidental ont contribué de 14 millimètres à l'élévation du niveau de la mer depuis 2003. C'est un tiers de l'élévation totale du niveau de la mer observée au cours de cette période.

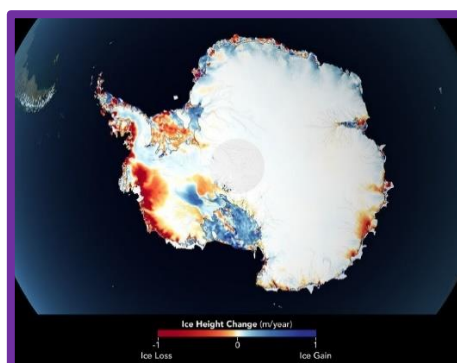


Figure 69 : Mesure des changements du niveau de glace en Antarctique entre 2003 et 2018



Les pertes massives au Groenland ont dépassé celles de l'Antarctique au cours de ces 16 années. Les chercheurs ont constaté que le Groenland perdait en moyenne 200 gigatonnes de glace par an, en grande partie à cause des glaciers côtiers. En analysant divers ensembles de données, les scientifiques ont constaté que le principal facteur de perte au Groenland était la fonte de surface due à des températures estivales de plus en plus chaudes. L'eau plus chaude de l'océan a également érodé les glaciers à leurs avants dans certains bassins. L'inlandsis de l'Antarctique, qui est environ huit fois plus grand que celui du Groenland, a perdu environ 118 gigatonnes de glace par an. Une analyse plus poussée a montré que des températures océaniques plus chaudes causaient la majeure partie de la perte de glace de l'Antarctique occidental. L'accumulation importante de neige et de glace dans certaines parties de l'Antarctique oriental a compensé certaines de ces pertes. En termes climatiques, la couverture de neige est importante parce qu'elle modifie la réflectance de surface de la Terre. La nature hautement réfléchissante de la neige combinée à son potentiel de couvrir de vastes régions de notre monde en font un facteur important dans l'équilibre énergétique de la Terre. En règle générale, la neige couvre plus de 40 % de la surface terrestre dans l'hémisphère Nord pendant les mois d'hiver, et reflète jusqu'à 80 ou 90 % de l'énergie solaire entrante, par rapport aux 10-20 % de l'énergie solaire que le sol nu reflète.

Les données du spectroradiomètre (MODIS), volant à bord des satellites Terra et Aqua de la NASA, permettent aux scientifiques de produire régulièrement des cartes mondiales de la couverture de neige et de glace (y compris la couverture de glace sur les grands lacs intérieurs), de la couverture de glace de mer, de la température de surface de la glace de mer et de l'albedo de surface. Ces produits 3 fournissent des cartes composites quotidiennes et de 8 jours à une résolution de jusqu'à 500 mètres par pixel. Snowmap, l'algorithme de cartographie de la neige, utilise l'indice normalisé de la différence de neige (NDSI) et d'autres tests de seuil spectral pour identifier la neige pixel par pixel. Icemap, l'algorithme de cartographie de la glace de mer, utilise le NDSI et la température de surface ainsi qu'une technique de fenêtre scindée pour estimer la température de surface de la glace. NDSI est utile parce que la neige et la glace reflètent plus de lumière dans le visible que dans la partie infrarouge à ondes courtes du spectre tandis que la réflectance de la plupart des nuages reste élevée dans l'infrarouge à ondes courtes.

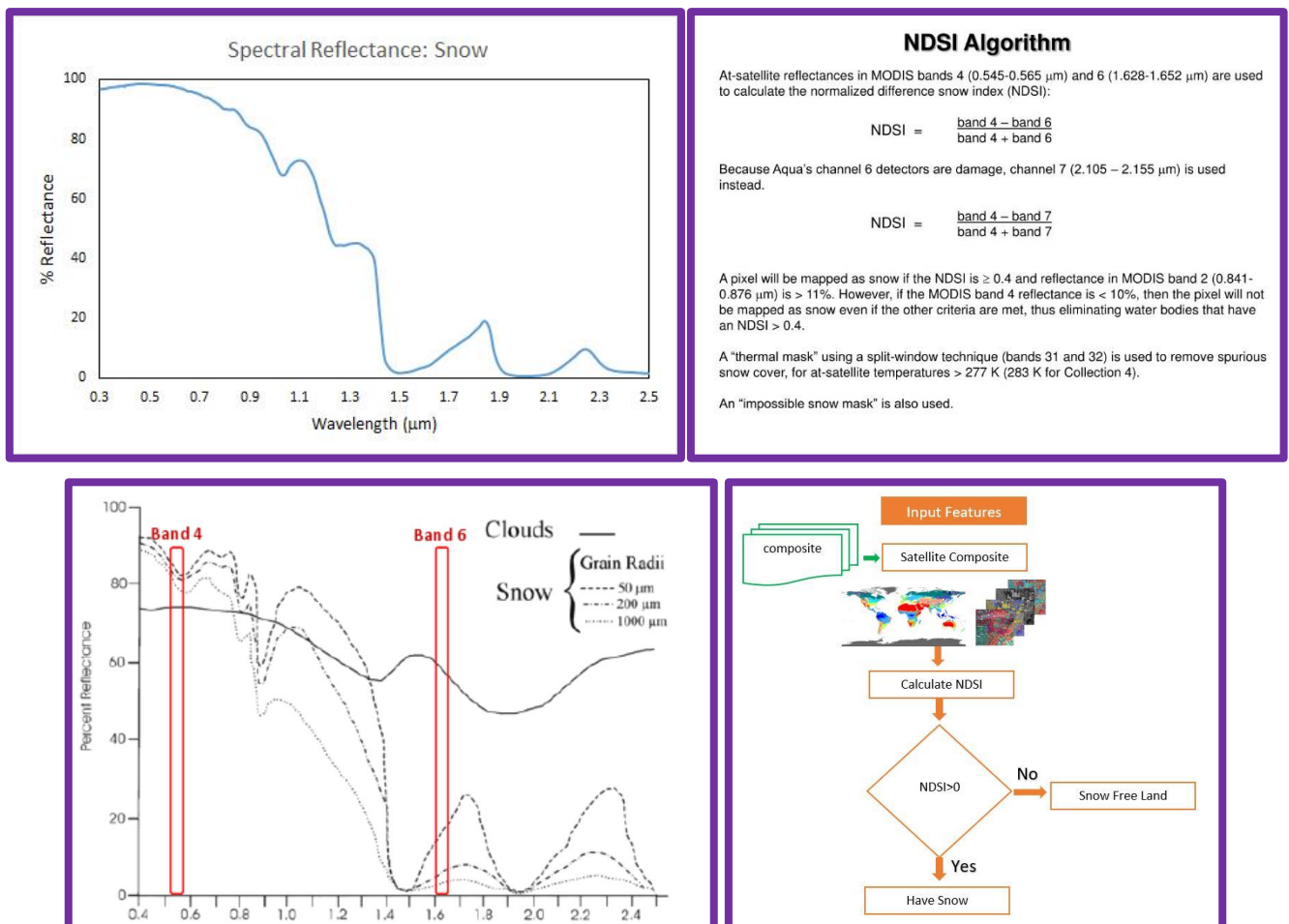


Figure 70 : Calcul du NDSI

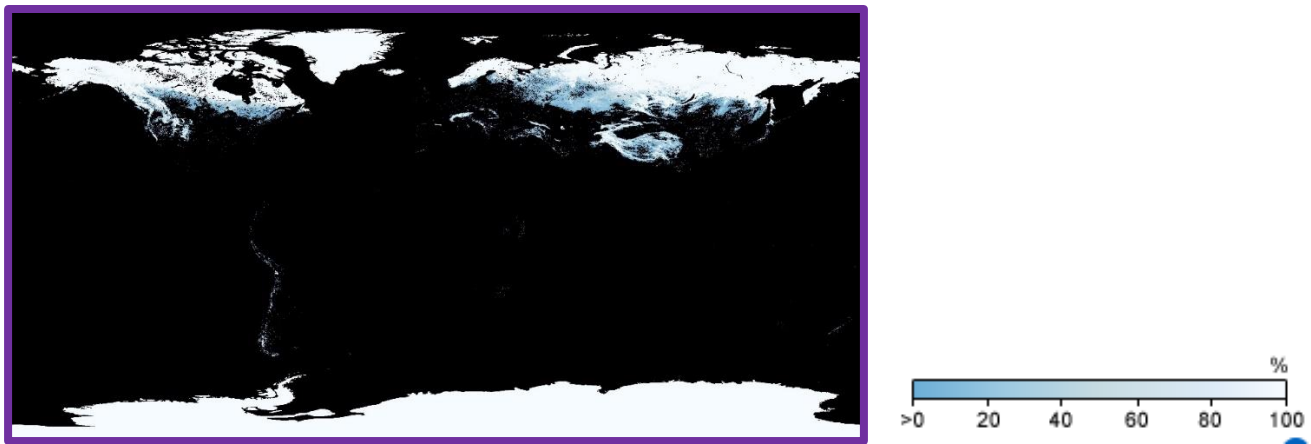


Figure 71 : Couverture neigeuse Avril 2021

## 2. MESURER LA TEMPERATURE DES OCEANS

La compréhension des processus océaniques et atmosphériques exige une connaissance de la température à laquelle ces processus se produisent. La télédétection par satellite a fourni des mesures de la température de surface (SST) grâce à des radiomètres IR depuis le début des années 1980 et grâce à des radiomètres à micro-ondes depuis 1997 sous les tropiques et depuis 2002 à l'échelle mondiale. La constellation actuelle de satellites produit des mesures globales du SST à des précisions utiles à de nombreuses fins scientifiques, opérationnelles et climatiques.

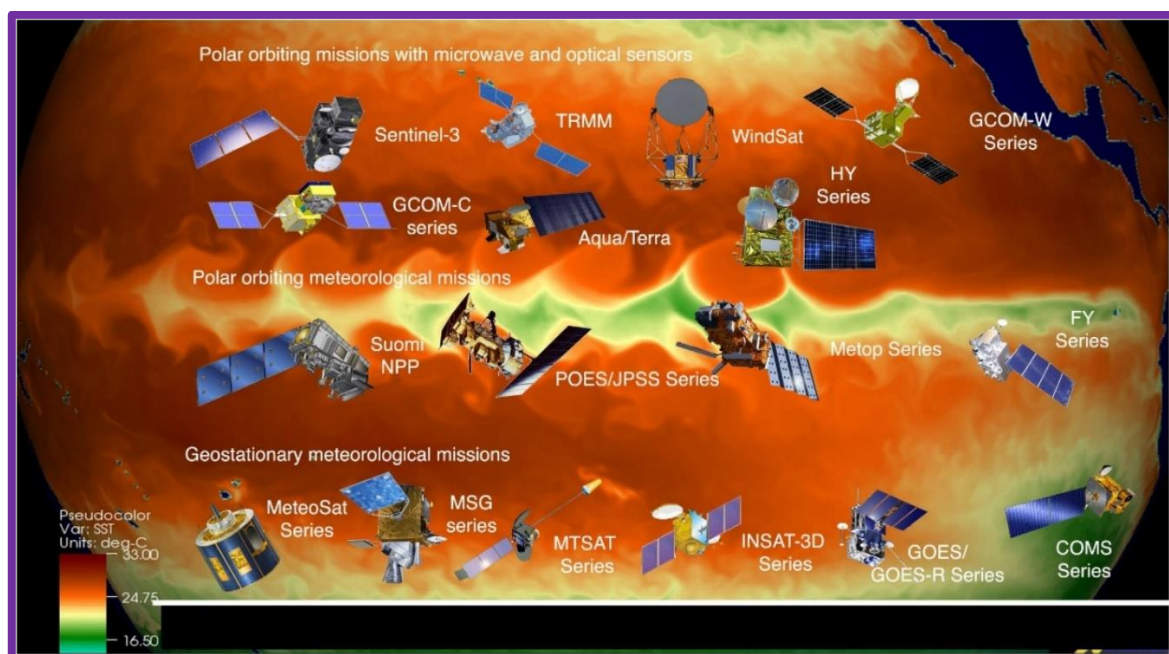


Figure 72 : La constellation de satellite mesurant la SST

Les mesures infrarouges thermiques de SST sont dérivés d'observations radiométriques à des longueurs d'onde d'environ  $3,7 \mu\text{m}$  et/ou près de  $10 \mu\text{m}$ . Bien que le canal de  $3,7 \mu\text{m}$  soit plus sensible il n'est principalement utilisé que pour les mesures nocturnes en raison d'une réflexion relativement forte de l'irradiation solaire dans cette région de longueur d'onde, qui contamine le rayonnement récupéré. Les deux bandes sont sensibles à la présence de nuages et à la dispersion par les aérosols et la vapeur d'eau atmosphérique. Pour cette raison, les mesures infrarouges thermiques de SST nécessitent d'abord une correction atmosphérique du signal récupéré et ne peuvent être effectuées que pour les pixels sans nuages. Ainsi, les cartes de SST compilées à partir de mesures infrarouges thermiques sont souvent des composites hebdomadaires ou mensuels qui permettent de disposer de suffisamment de temps pour capturer des pixels sans nuages sur une région.

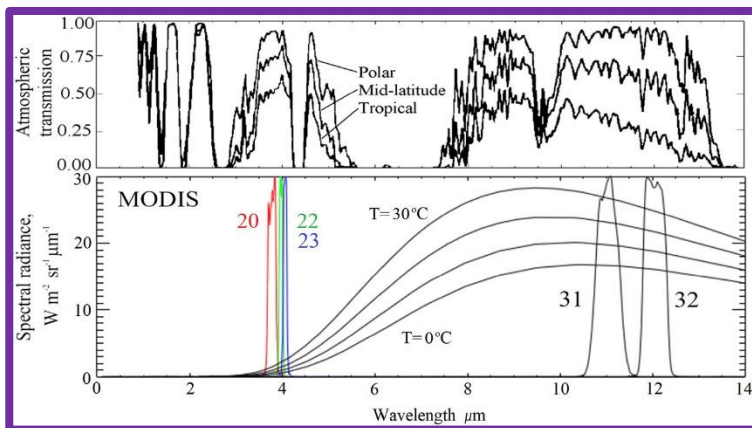


Figure 73 : Détermination de la température par mesure dans l'IR

Dépendance spectrale de la transmission atmosphérique pour les longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique d'environ 1 à 14  $\mu\text{m}$ , pour trois atmosphères caractéristiques (ci-dessus), et (ci-dessous) l'émission de corps noir pour des températures de 0, 10, 20 et 30  $^{\circ}\text{C}$ , et les fonctions de réponse spectrale relative des bandes de MODIS sur Aqua utilisées pour dériver le SST

En raison de la faible résistance du signal de la courbe de rayonnement Planck de la Terre dans la région des micro-ondes, la précision et la résolution sont plus faibles pour le SST dérivé des mesures des micro-ondes par rapport au SST dérivé des mesures par infrarouges thermiques. Cependant, l'avantage obtenu avec les micro-ondes est que le rayonnement à ces longueurs d'onde plus longues est en grande partie inchangé par les nuages et généralement plus facile à corriger pour les effets atmosphériques

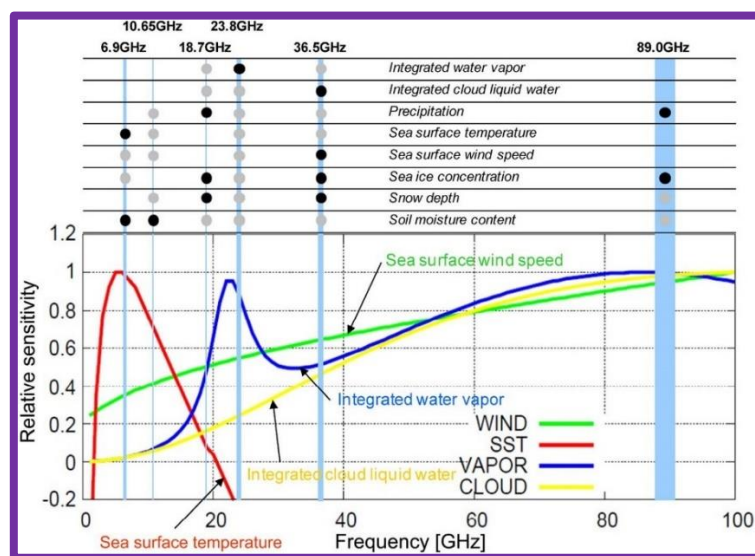


Figure 74 : utilisation des micro-ondes pour étudier les océans

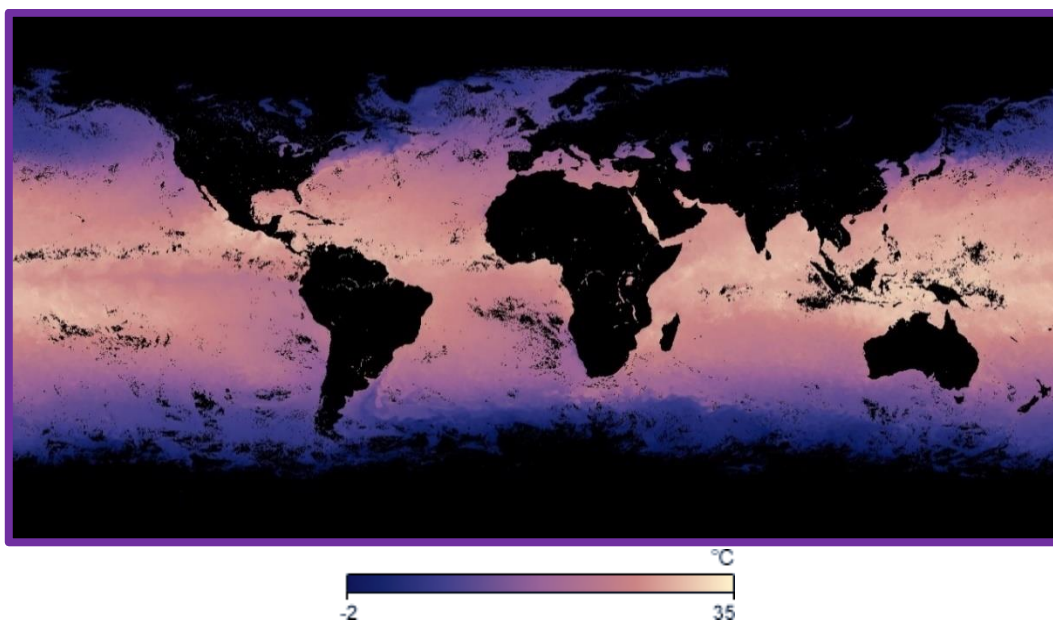


Figure 75 : Mesure de la SST par IR (8-15 novembre 2016. Capteur MODIS)

Dérivée des mesures de réflectance recueillies par les instruments MODIS à bord des satellites Terra et Aqua de la NASA, la température de surface de la mer est une estimation de la chaleur de la surface de l'océan (millimètre supérieur). L'algorithme utilise plusieurs techniques de fenêtre atmosphérique pour



estimer les paramètres atmosphériques qui sont nécessaires pour compenser l'absorption et la diffusion de l'énergie rayonnée et réfléchiée par l'océan. Cette température mesurée de l'océan proche de la surface est équivalente à la température de la partie supérieure de 10-20 cm à 1 mètre mesurée par les thermomètres conventionnels sur les bouées et les navires. La détermination de la température de surface de la mer est basée sur les longueurs d'ondes intermédiaires et infrarouges lointains (IR), à l'aide d'un algorithme qui exploite les différences de transmissivité atmosphérique dans les différentes bandes IR pour permettre une estimation très précise des effets atmosphériques. Un masque terrestre est utilisé pour marquer les pixels non aquatiques tandis qu'un masque d'étendue de glace limite la couverture marine polaire. Une séquence de tests d'homogénéité spatiale et temporelle est appliquée pour valider la qualité des observations sans nuages.

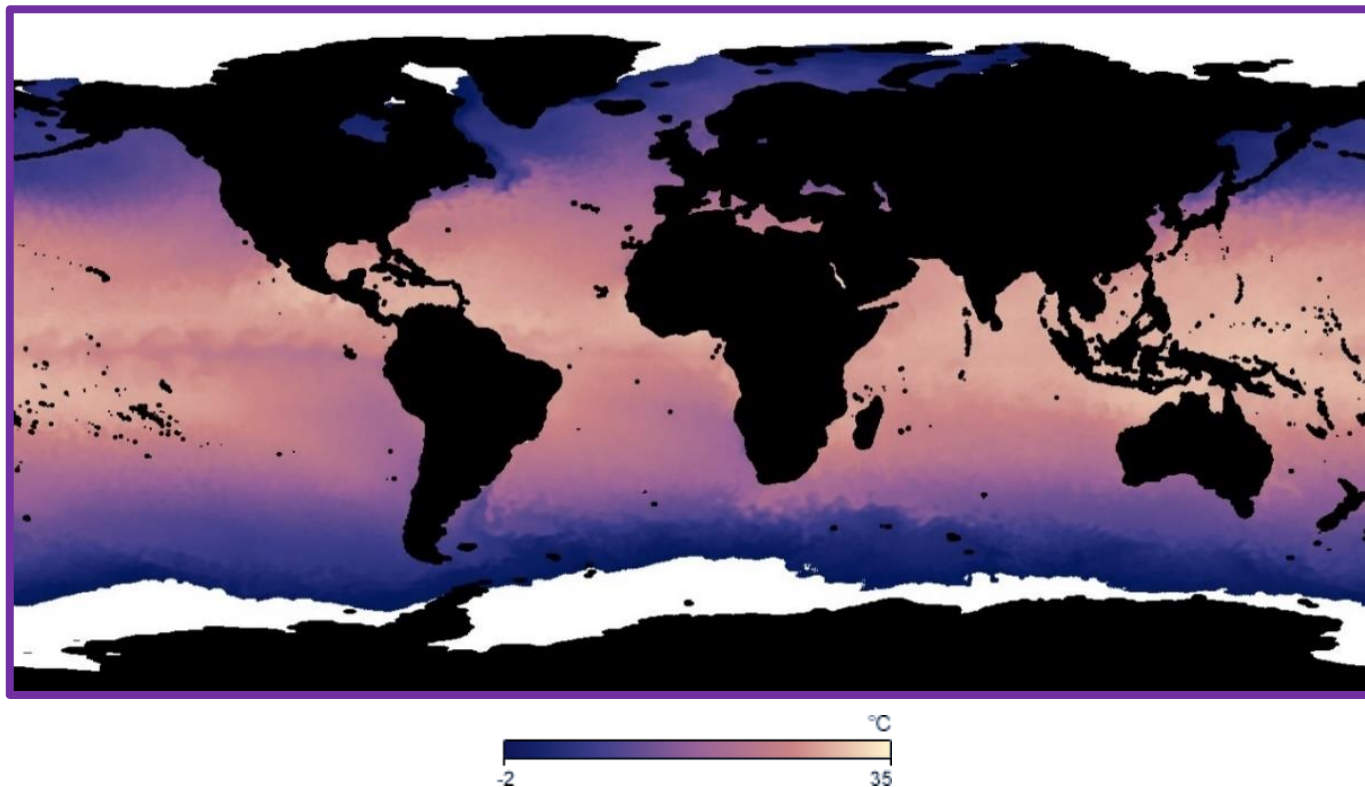


Figure 76 : Mesure de la SST par micro-ondes (8-15 novembre 2016. capteur TMI, AMSR-E, AMSR2, and WindSat)

Cet ensemble de données SST dérivé de radiomètres à micro-ondes (TMI, AMSR-E, AMSR2 et WindSat) qui peuvent voir à travers les nuages. Les données fournissent une bonne résolution temporelle (d'un jour), particulièrement importante dans les zones où la couverture nuageuse persiste.

### 3. MESURER LA VITESSE DES VENTS DEPUIS L'ESPACE

Le vent est le mouvement de l'air et est causé par la différence de pression atmosphérique entre les systèmes à haute et basse pression. Sur le continent, on utilise des instruments appelés anémomètres pour mesurer la vitesse du vent de surface et la direction du vent mais au-dessus des océans, la mesure des caractéristiques du vent de surface est beaucoup plus limitée, et est principalement obtenue à partir d'anémomètres situés dans les petites stations météorologiques insulaires, sur les navires et sur les bouées flottant dans l'océan. Étant donné que les régions océaniques sont si grandes, en particulier l'océan Pacifique, la connaissance des caractéristiques du vent sur ce vaste espace est importante pour les prévisions météorologiques, la navigation océanique et l'étude du climat. C'est là que les mesures par satellite apportent l'avantage le plus critique. L'une des premières approches a été d'utiliser des images visibles pour étudier le mouvement des nuages et déterminer indirectement la vitesse et la direction du vent. Cette méthode est encore utilisée aujourd'hui. Les radiomètres et les mesures des diffusiomètres sont plutôt basés sur des signaux de rayonnement micro-ondes (MW) provenant de la surface de l'océan.

Deux types d'instruments à micro-ondes mesurent les vents de surface de l'océan, le radiomètre à micro-ondes passif et le diffusiomètre actif à micro-ondes. Le radiomètre mesure la rugosité de la surface de l'océan corrélés aux vitesses du vent à 10 mètres au-dessus de la surface de l'eau. On ne peut récupérer que la vitesse du vent. Un modèle de transfert radiatif et un modèle d'émissivité océanique sont nécessaires pour tirer les vitesses du vent les températures de luminosité de l'océan. Cette technique est inutilisable au-dessus des continents.

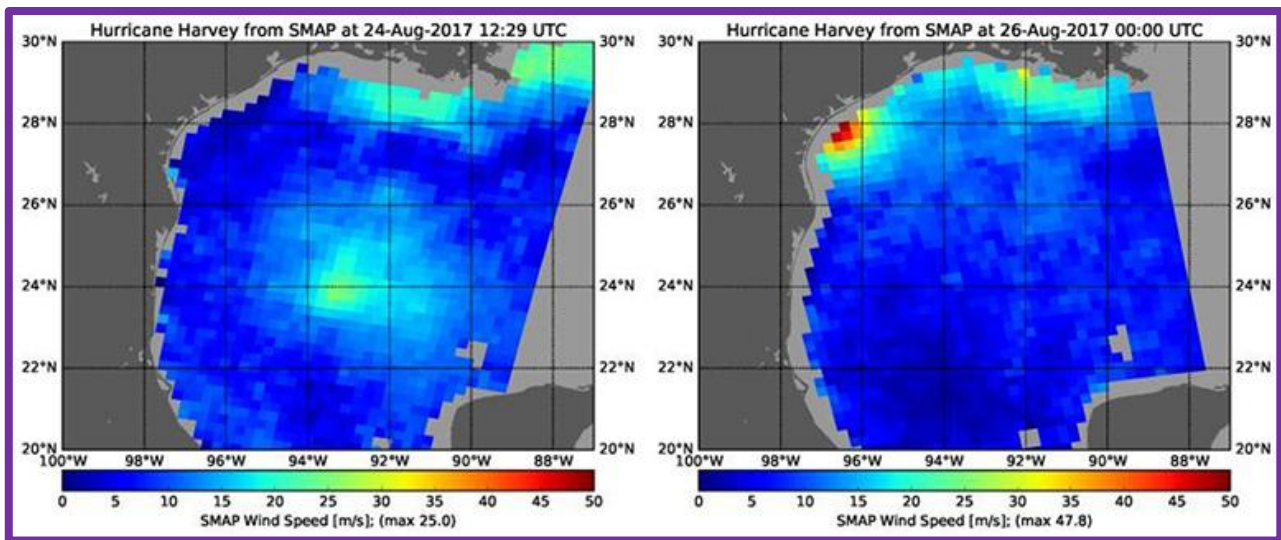


Figure 77 : L'intensification rapide du vent de l'ouragan Harvey vue par le capteur SMAP de la NASA

L'un des facteurs de la recherche sur les cyclones tropicaux que la NASA étudie est l'intensification rapide. L'intensification rapide de l'ouragan Harvey est observée dans cette paire d'images de la vitesse du vent de surface de l'océan observées par l'instrument radiométrique à bord du satellite Soil Moisture Active Passive (SMAP) de la NASA à 7 h 29 le 24 août 2017 (à gauche) et à 19 h (à droite). La couleur indique la vitesse du vent, le rouge étant le plus haut et le bleu le plus bas. Les images montrent que la vitesse maximale du vent de Harvey est passée d'environ 25 m/s à environ 47,8 ms dans les 36 heures précédant l'arrivée sur le continent

Les diffusiomètres sont des instruments actifs, de type radar, embarqués à bord des satellites défilants. Le radar émet un signal hyperfréquence et recueille le coefficient de rétrodiffusion de la surface de la mer. Les variations d'amplitude du signal rétrodiffusé sont causées par les petites vagues (de l'ordre du cm) créées par le vent. Seule une mesure est nécessaire pour obtenir la vitesse mais plusieurs sont indispensables pour obtenir la direction du vent. C'est pourquoi la zone mesurée à la surface de l'océan est visée tour à tour par trois antennes différentes qui fournissent un triplet de valeurs de rétrodiffusion. Ces mesures effectuées par les diffusiomètres sont peu sensibles à la présence de nuages et à l'illumination solaire. Les diffusiomètres embarqués. Depuis la fin du fonctionnement de QuikSCAT (de la NASA) le 23 novembre 2009, seules les données de deux diffusiomètres sont disponibles en orbite. ASCAT sur MetOp (EUMETSAT) est un radar en bande C (mesure à une fréquence de 5,255 GHz) conçu principalement pour la mesure mondiale des vents au-dessus de la surface de la mer. OSCAT sur Oceansat-2 (ISRO - Inde) dispose d'un radar en bande Ku (mesure à une fréquence de 13,515 GHz).

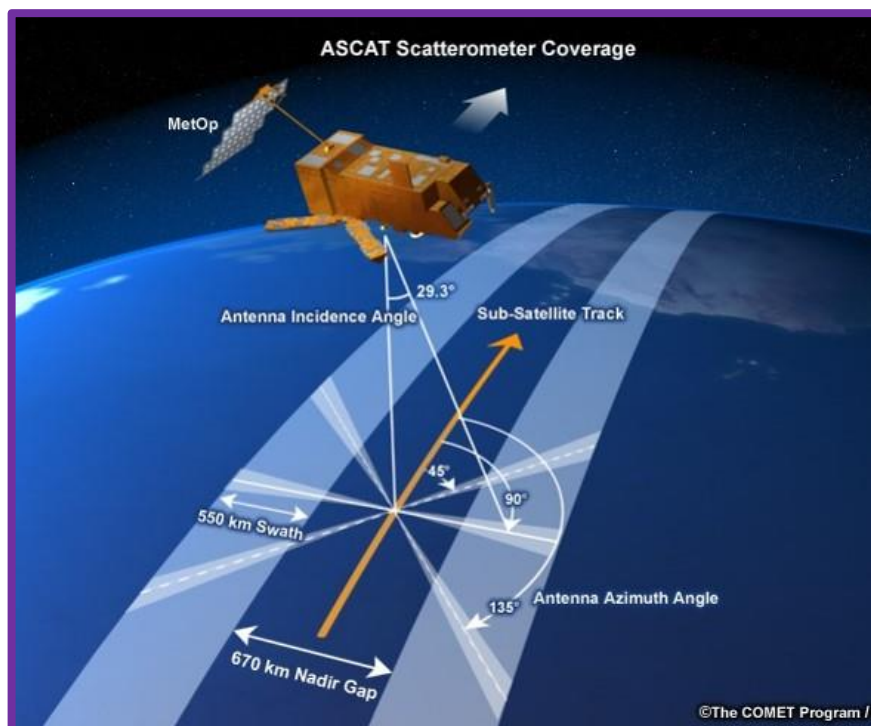


Figure 78 : Principe du diffusiomètre Ascet

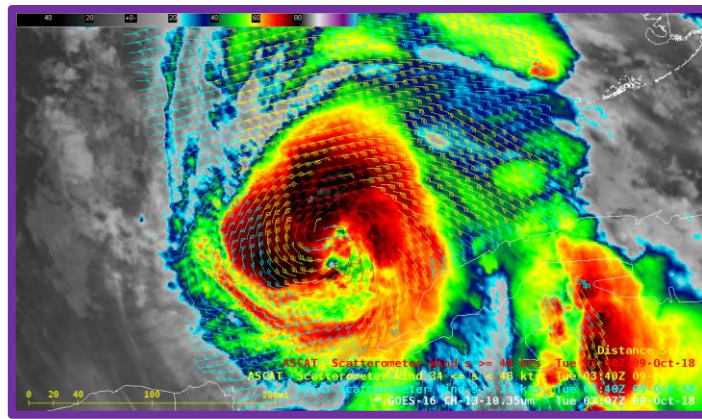


Figure 79 : Mesure de la vitesse des vents au sein du Cyclone Michael le 9 octobre 2018

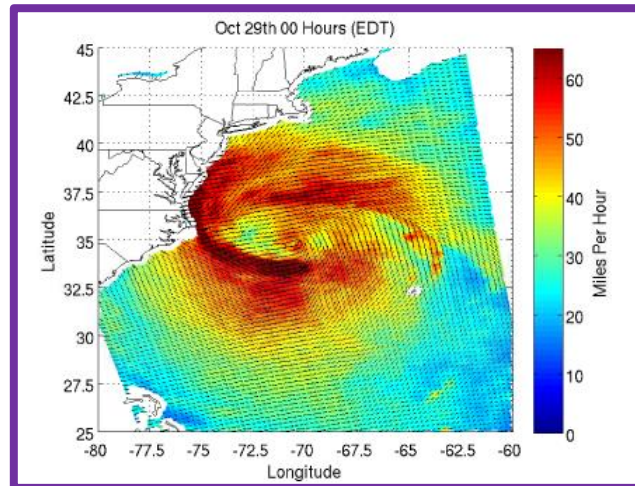


Figure 80 : Cyclone Sandy observé par le diffusiomètre OSCAT

Lancée le 22 août 2018, Aeolus est la première mission satellite à acquérir des profils du vent terrestre à l'échelle mondiale. Ces observations en temps quasi réel amélioreront l'exactitude des prévisions météorologiques et climatiques numériques et feront progresser notre compréhension de la dynamique tropicale et des processus agissant sur la variabilité du climat.



Figure 81 : Le satellite Aeolus

Pour remplir sa mission le satellite ADM-Aeolus emporte un instrument unique baptisé Aladin (Atmospheric Laser Doppler Instrument). Aladin est un Lidar-Doppler émettant un faisceau de photons dans l'ultraviolet. D'autres lidars ont déjà été envoyés dans l'espace, comme CALIOP à bord du satellite franco-américain Calipso mais ce lidar fonctionne dans le visible (532nm) et l'infrarouge (1064nm) et ne se réfléchit que sur les grosses particules (aérosols ou microgouttelettes d'eau), ce type de laser est donc inopérant là où l'atmosphère est limpide. Grâce à sa lumière ultraviolet l'instrument Aladin peut mesurer la vitesse du vent même par temps clair contrairement à ses prédécesseurs.



Aladin comprend un système émettant un faisceau lumineux et un système de collecte et d'analyse de la lumière réfléchi. L'émetteur est un laser de forte puissance qui génère des impulsions lumineuses dans l'ultraviolet proche (355 nm) de très courte durée (quelques milliardièmes de seconde) et très intenses en direction de l'atmosphère terrestre. Sur les milliards de photons produits, seule une centaine d'entre eux est réfléchi par les molécules d'air (diffusion de Rayleigh), les gouttelettes d'eau des nuages et les aérosols (diffusion de Mie) en suspension dans l'air. La seconde partie de l'instrument Aladin comprend un télescope. Le télescope collecte les photons renvoyés par l'atmosphère et les envoie vers deux capteurs très sensibles qui analysent cette lumière réfléchi. Celle-ci a subi un léger décalage dans le spectre électromagnétique par effet Doppler produit par la vitesse de déplacement des particules et molécules ayant réfléchi cette lumière analysée et qui sont transportées par le vent. Ainsi plus la vitesse du vent est élevée, plus les molécules d'air, les gouttelettes d'eau et les particules d'aérosols ont une vitesse de mouvement également élevée, et plus le décalage spectral de la lumière réfléchi est alors prononcé. Le signal retourné par les molécules est beaucoup plus faible que celui renvoyé par les particules d'eau et les aérosols, et nécessite donc un rayon de forte puissance. Aladin doit mesurer les deux types de réflexion car ces données sont complémentaires : dans un ciel dégagé et au-dessus d'une altitude de 4 km seules les molécules d'air sont susceptibles de réfléchir le rayonnement lumineux. Pour analyser les deux catégories de rayonnement réfléchi, Aladin dispose de deux types d'interféromètre, un pour les photons renvoyés par les aérosols et grosses particules et un pour ceux réfléchis par les molécules. La vitesse des vents est déterminée avec une précision de 1 à 2 mètres par seconde en fonction de l'altitude.

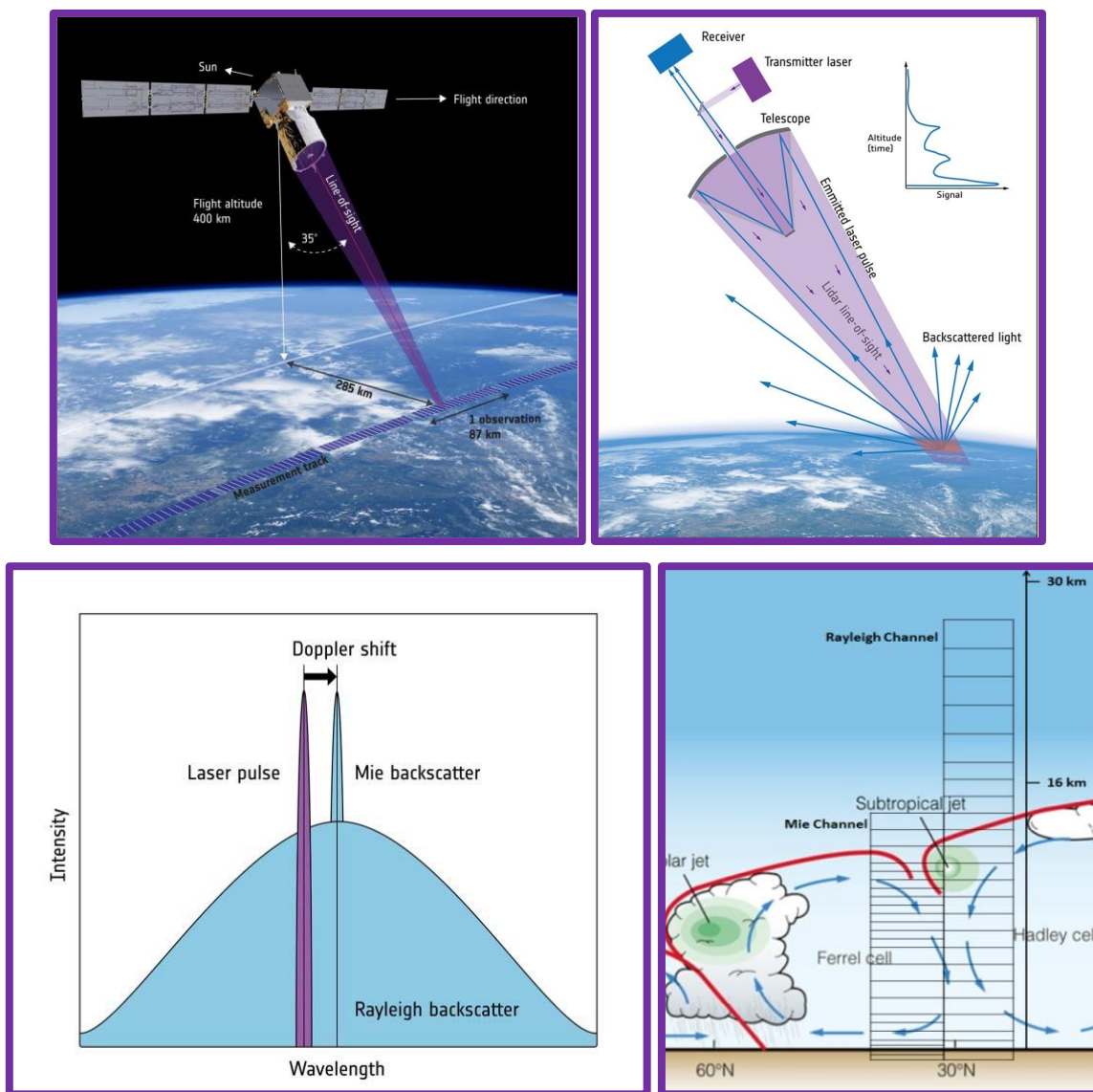


Figure 82 : Principe de fonctionnement du LIDAR d'Aeolus

Le lidar émet une impulsion laser vers l'atmosphère, puis recueille, échantillonne et récupère la fréquence du signal rétrodiffusé. Le satellite vole avec l'instrument ALADIN pointant vers la Terre dans un plan quasi perpendiculaire à la trajectoire de vol et 35° décalé du nadir dans la direction anti-soleil. La ligne de mire (LOS : light of sight) est orientée de telle sorte que la vitesse relative à l'intersection avec la Terre est nulle. Toutes les mesures sont prises le long du LOS. Le déplacement doppler du signal rétrodiffusé reflète la vitesse relative du vent le long du LOS et doit être traité comme la composante horizontale de la vitesse du vent, HLOS (Horizontal Line-of-Sight), référencé au sol. Les valeurs verticales ainsi que horizontales peuvent être programmer, offrant une flexibilité d'observation.

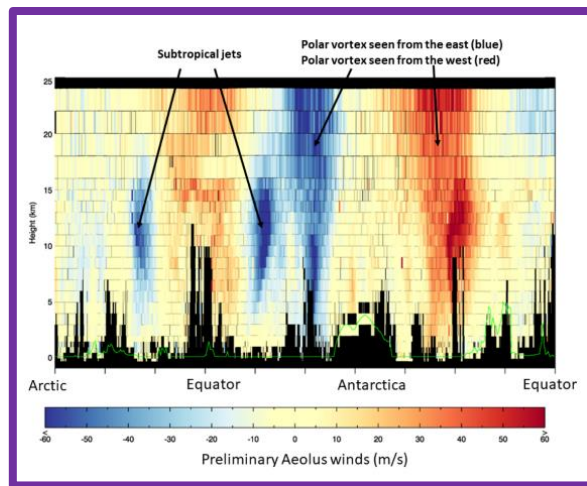


Figure 83 : Premières données sur le vent du satellite Aeolus de l'ESA

Ces données proviennent des trois quarts d'une orbite autour de la Terre. L'image montre des vents d'est et d'ouest à grande échelle entre la surface de la Terre et la stratosphère inférieure, y compris les courants-jets. Comme le satellite orbite de l'Arctique vers l'Antarctique, il détecte, par exemple, de forts courants de vents d'ouest, appelés vortices troposphériques (montrés en bleu) de chaque côté de l'équateur aux latitudes moyennes. En orbite plus loin vers l'Antarctique, Aeolus observe les forts vents d'ouest (représentés en bleu gauche de l'Antarctique et en rouge à droite de l'Antarctique) encerclant le continent antarctique dans la troposphère et la stratosphère (Vortex polaire stratosphérique). La direction globale du vent est la même le long du vortex polaire, mais parce que le produit éolien Aeolus est lié à la direction de visualisation du satellite, la couleur passe du bleu au rouge au fur et à mesure que le satellite passe sur le continent antarctique (crédit image : ESA/ECMWF)

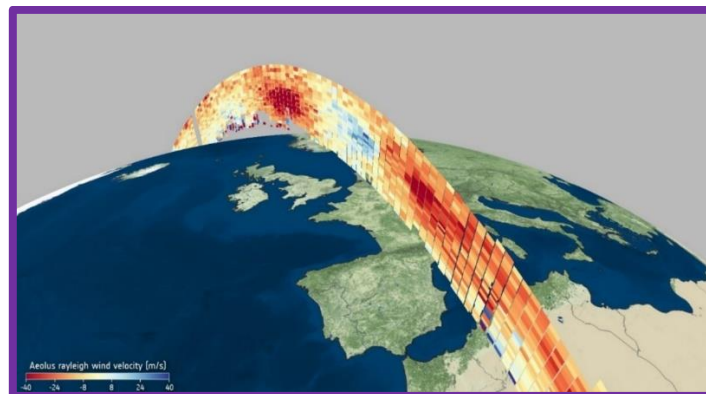


Figure 84 : Exemple de profil atmosphérique de la vitesse des vents (6 mai 2020) au-dessus de l'Europe

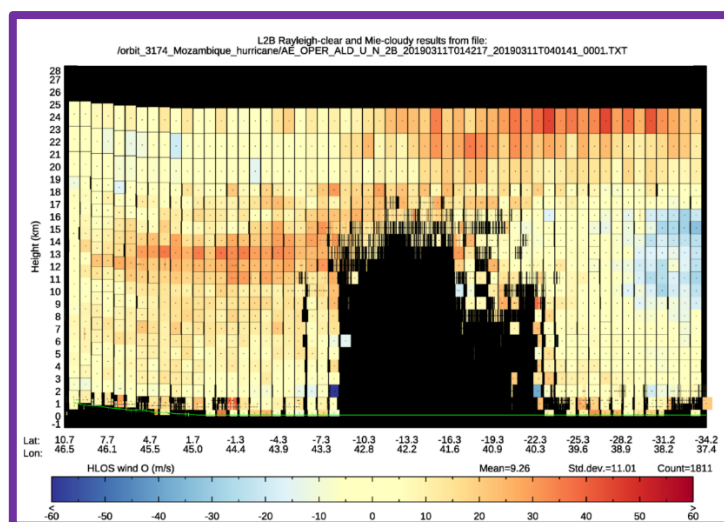


Figure 85 : Vent mesuré par le satellite Aeolus lors de la traversée du cyclone Idai à l'ouest de Madagascar le 11 mars 2019

Le rouge indique que le vent soufflant d'est en ouest (est) et le bleu indique un vent soufflant d'ouest en est (vents d'ouest). Comme Aeolus mesure le vent dans l'atmosphère sans nuages, et dans les nuages minces et non au-dessus des nuages épais, les mesures ici sont celles qui entourent Idai. La tache noire est la partie du cyclone, qui a été couverte par une épaisse couverture de nuages en forme de spirale. L'image montre de forts vents d'est au nord de l'ouragan (en rouge à gauche de l'image), avec des vents jusqu'à 150 km/h (au-dessus de 40 m/s). Dans le coin supérieur droit (altitude de 22-25 km), le jet tropical stratosphérique peut être vu en rouge, et plus bas vers le bas sur la droite (altitude de 10-16 km) le jet subtropical de l'ouest dans l'hémisphère sud est visible en bleu

## PARTIE 3 : ACTIVITES PEDAGOGIQUES

On se propose ici de présenter deux activités permettant d'appréhender le changement climatique à travers le double prisme de l'esprit critique et des technologies spatiales

### 1. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ESPRIT CRITIQUE

Cette première activité est destinée au cycle 4, elle a pour objectif de montrer l'importance du regard critique face aux nombreuses assertions associées au changement climatique.

#### 1.1. Proposition d'une séquence autour du réchauffement climatique à travers le prisme de l'esprit critique (cycle 4)

On commence ici par expliquer les objectifs et la construction de la séquence

##### Objectifs :

En s'appuyant sur les recommandations du Conseil Supérieur de l'Education Nationale qui décrit ainsi l'esprit critique dans son rapport sur l'éducation à l'esprit critique de 2021 : « Exercer son esprit critique, ce n'est pas tout critiquer mais savoir accorder sa confiance à bon escient », on cherche ici à former des citoyens responsables et engagés c'est-à-dire des citoyens :

- Capables de comprendre le sens des débats de société
- Capables de participer de manière constructive et responsable à ces débats
- Capables de distinguer savoirs, opinions et croyances

La séquence est constituée par différents axes de travail à disséminer « au fil de l'eau » en classe :

- La construction des connaissances scientifiques
- Les biais argumentatifs et cognitifs
- Les spécificités de l'écriture médiatique

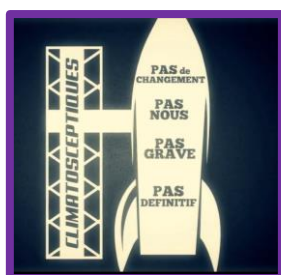
##### Introduction de la séquence

On décide de partir de supports quotidiens sur les climatosceptiques : tweet de Trump, extrait de journaux TV sur les COP...

**Exemple 1 :** Tweet de l'ancien président de USA Donald Trump



**Exemple 2 :** Vidéo sur les climatosceptiques : <https://www.youtube.com/watch?v=yKpPXGb1-w0>





On propose dès lors un plan pour présenter les différents arguments face aux climatosceptiques

- 1 Le réchauffement climatique est observable et mesurable
- 2 L'impact de l'activité humaine dans ce réchauffement climatique
- 3 Les conséquences observables du réchauffement climatique
- 4 Un phénomène irréversible

---

1.2. Regards croisés : apports du spatial et de l'esprit critique pour traiter spécifiquement la thématique de la montée du niveau des eaux

Dans le cadre de plan de cette séquence, on choisit de présenter un exemple d'activité élève fondé sur l'un des points de ce plan. On considérera donc le cas de la montée du niveau marin dans le cadre des conséquences observables du réchauffement climatiques

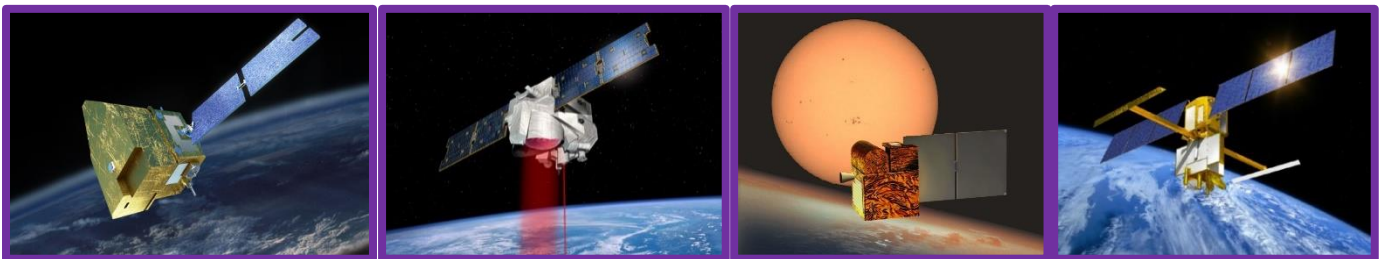
**Avant-propos : Espace et observation de la montée du niveau marin**

On propose ici un corpus documentaire à destination des élèves afin d'établir la contribution des outils spatiaux à l'étude de l'élévation du niveau de la mer

*Document 1 : Vidéo CNES sur le rôle des agences spatiales dans la lutte contre le changement climatique*



*Document 2 : Exemples de satellites permettant d'étudier le changement climatique*



**De gauche à droite : Microcarb 2021, Merlin 2022, Picard 15 juin 2010, Swot 2022**

*Document 3 : Vidéo le Monde Les 4 conséquences du réchauffement climatique*

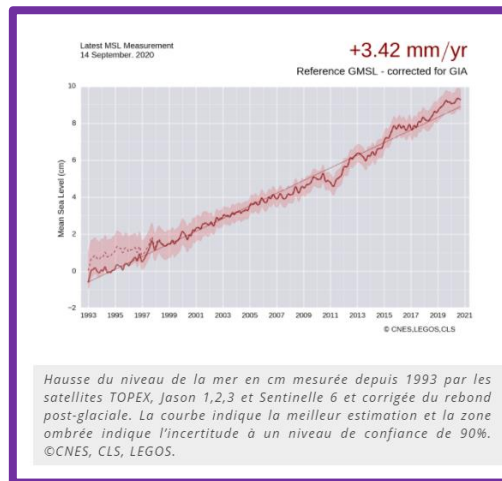


<https://www.youtube.com/watch?v=T4LVXCCmIKA>

#### Document 4 : Les satellites altimétriques et la mesure des océans

Basée sur les satellites altimétriques (depuis 1993) : TOPEX, JASON 1/2/3 et Sentinelle 6 en décembre 2020

##### Document 4.1 : Exemple de mesure



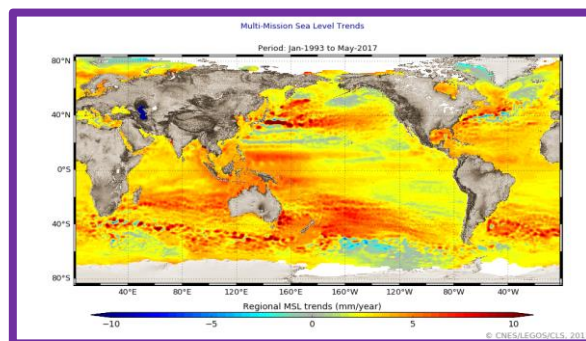
##### Document 4.2 : Vidéo ressource du CNES :

Benoît Meyssignac, présente les recherches, les études permettant l'analyse et la compréhension de la hausse du niveau des océans.

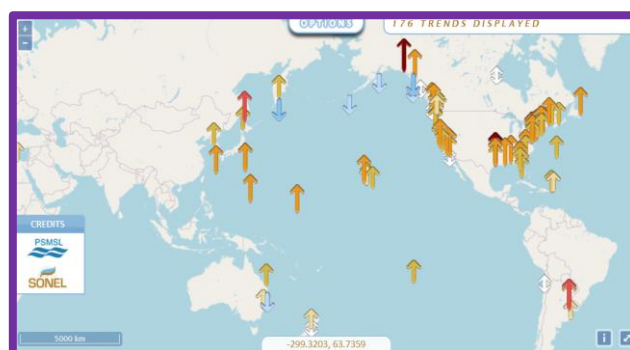


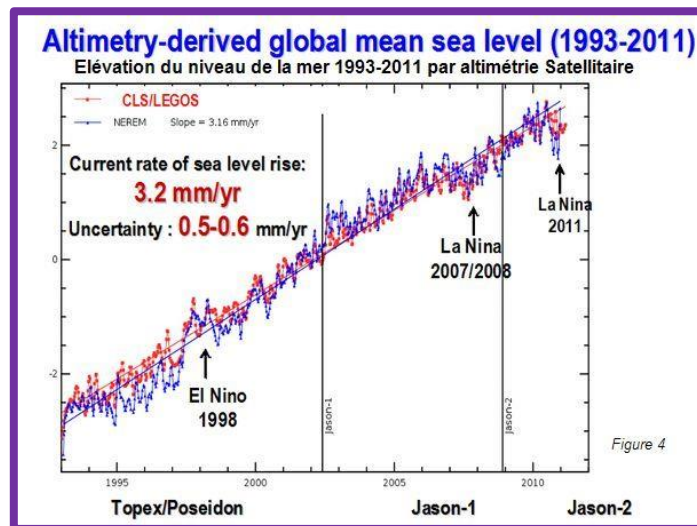
[https://videotheque.cnes.fr/index.php?urlaction=doc&id\\_doc=32425&rang=1](https://videotheque.cnes.fr/index.php?urlaction=doc&id_doc=32425&rang=1)

##### Document 4.3 : Variabilité régionale



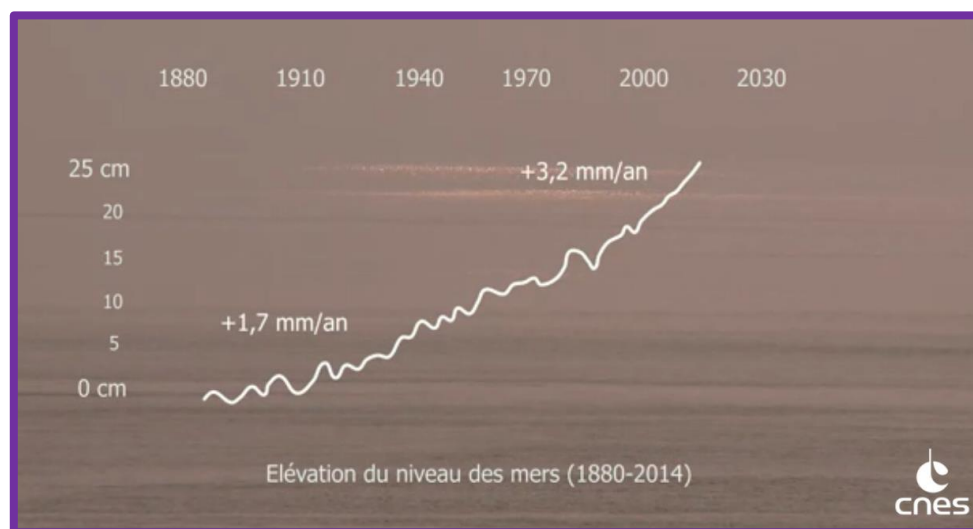
##### Document 4.4 : Données complémentaires : les marégraphes





L'altimétrie par satellite a révélé pour la première fois que le niveau de la mer n'augmente pas de manière uniforme en fonction des années, notamment El Nino/ La Nina

Depuis 1993 (donc depuis l'exploitation satellitaire), l'augmentation est moyennée à environ 3,3 mm/an. Mais les marégraphes indiquent qu'avant 1990, le niveau de la mer augmentait moins vite, à raison de 1,5 à 1,7 mm/an. Il y a donc eu une accélération au cours du 20<sup>e</sup> siècle qui est apparue vers la fin des années 80.

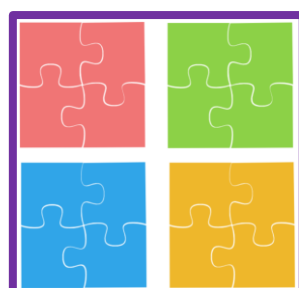


## **Présentation de la séquence : Activité mosaïque sur la montée du niveau marin**

### **1. Phase d'introduction :**

- 1 On peut amener les élèves à s'interroger : « Quels sont les facteurs qui ont une influence sur le niveau des eaux », cette activité est sous forme de TP mosaïque (classe puzzle)
- 2 Formulation d'une hypothèse individuelle.
- 3 Constitution de différents groupes constitués en fonction des hypothèses.

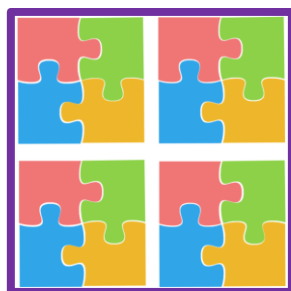
### **Temps 1 - Groupe d'experts : 1 expérience pour chaque hypothèse.**





## **Temps 2 - Mosaïque (groupes d'apprentissage)**

- 1 Constitution de nouveaux groupes : chaque hypothèse est représentée.
- 2 Mutualiser les observations et faire du lien entre les résultats.



### **2. Les hypothèses à effectuer**

« Il existe un lien entre l'utilisation de ressources d'énergie fossiles par l'Homme et la montée du niveau des eaux »

« Il existe un lien entre la quantité de CO<sub>2</sub> libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

« Il existe un lien entre la fonte des glaces et la montée du niveau des eaux »

« Il existe un lien entre la variation de l'albedo et la montée du niveau des eaux »

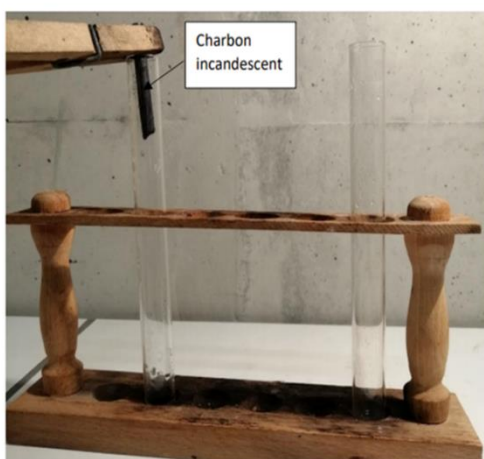
« Il existe un lien entre l'élévation de la température des océans et la montée du niveau des eaux »

### **3. Les expériences support**

« Il existe un lien entre l'utilisation de ressources d'énergie fossiles par l'Homme et la montée du niveau des eaux »

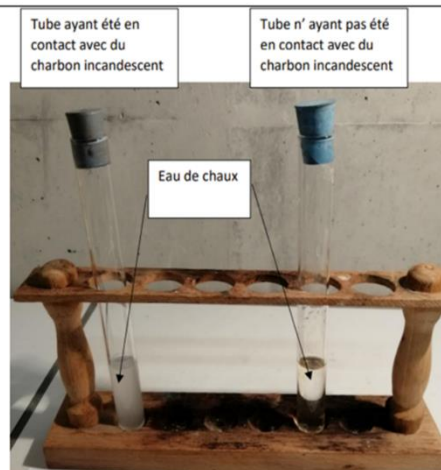
#### **Début de la modélisation**

Le bâton de charbon incandescent est mis à brûler une dizaine de secondes dans le tube de gauche. Puis le charbon est retiré et les deux tubes sont rapidement bouchés.



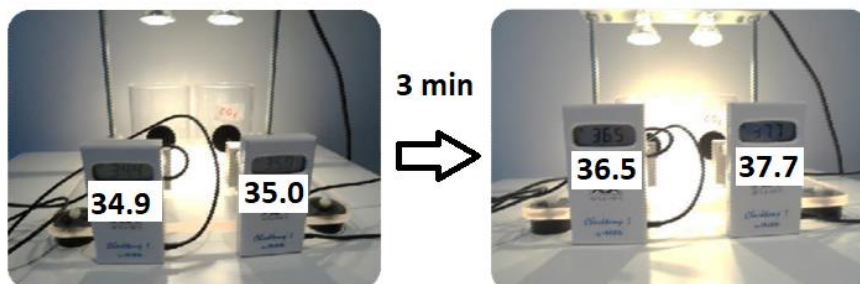
#### **Résultats**

De l'eau de chaux est introduit dans les deux tubes. L'eau de chaux est un réactif incolore et translucide, qui se trouble en présence de CO<sub>2</sub>.



« Il existe un lien entre la quantité de  $\text{CO}_2$  libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

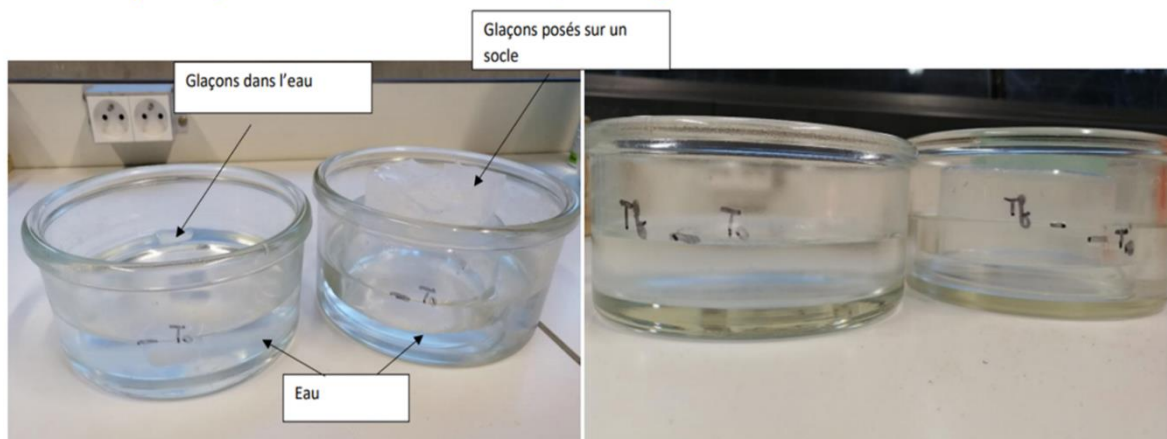
Dans cette expérience, nous allons mesurer la variation de la température dans 2 béchers placés sous des lampes : l'un contient de l'air et l'autre de l'air enrichi en  $\text{CO}_2$



Après 3 min, la température de l'air est plus élevée dans le bécher dont l'air est enrichi en  $\text{CO}_2$

« Il existe un lien entre la fonte des glaces et la montée du niveau des eaux »

Dans cette expérience, nous allons tester le lien entre la fonte des glaces et la montée des eaux



Début de la modélisation  
( $T_0$  marque le niveau initial de l'eau)

Résultats après 1H  
( $T_f$  marque le niveau de l'eau à la fin de la modélisation)

« Il existe un lien entre la variation de l'albedo et la montée du niveau des eaux »

Dans cette expérience, nous allons tester les effets de la température sur un liquide.

#### Début de la modélisation

La marque noire montre le niveau du liquide au début de la modélisation.



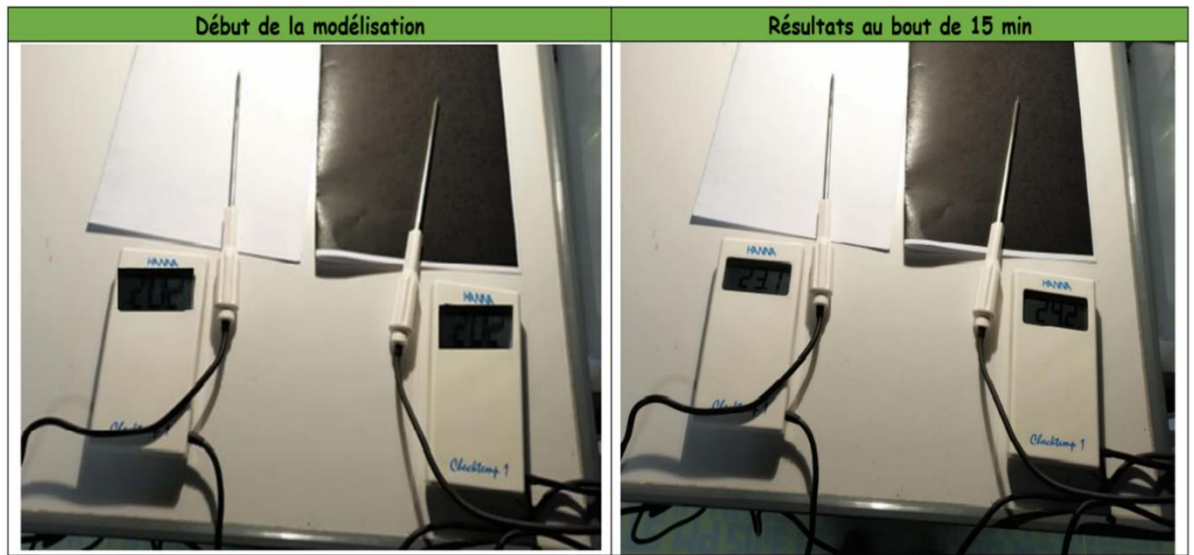
#### Résultat

après un rapide chauffage de quelques secondes pour une élévation de  $0,6^\circ\text{C}$ .

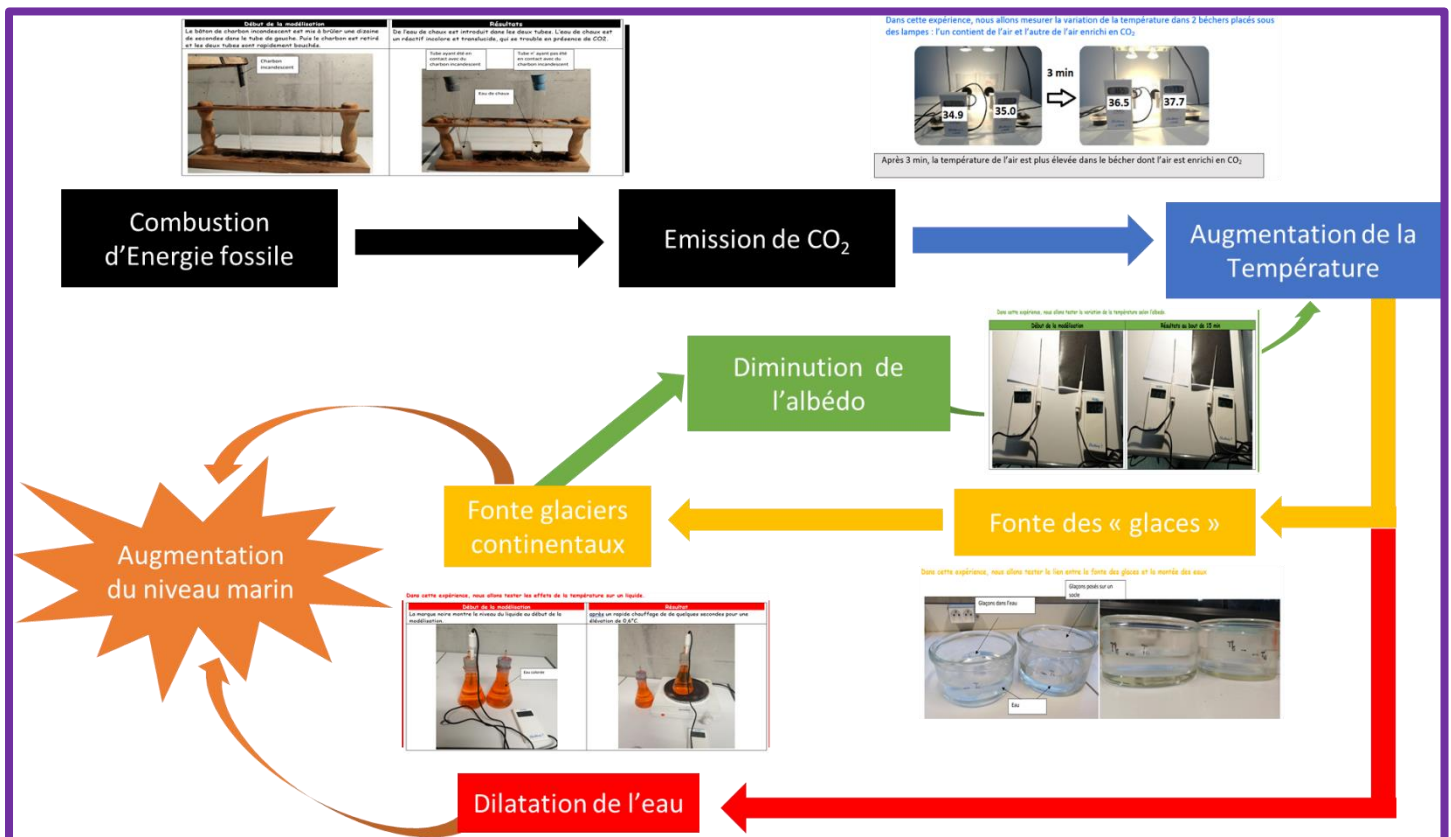


« Il existe un lien entre l'élévation de la température des océans et la montée du niveau des eaux »

Dans cette expérience, nous allons tester la variation de la température selon l'albedo.



#### 4. Les relations à établir



#### 5. L'apport du spatial

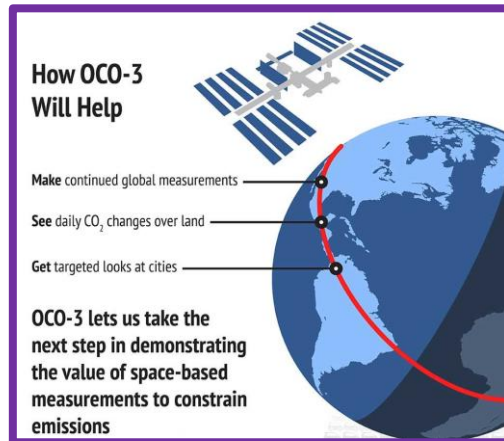
L'objectif est maintenant de proposer aux élèves des données spatiales venant appuyer leurs observations expérimentales. Ces documents peuvent être fournis (pour être visualisés, analysés...) ou produits directement par les élèves.

##### 1. « Il existe un lien entre l'utilisation de ressources d'énergie fossiles par l'Homme et la montée du niveau des eaux »

- **L'apport du spatial : « La combustion de ressources d'énergie fossiles libère du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ».**

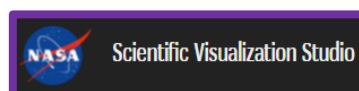
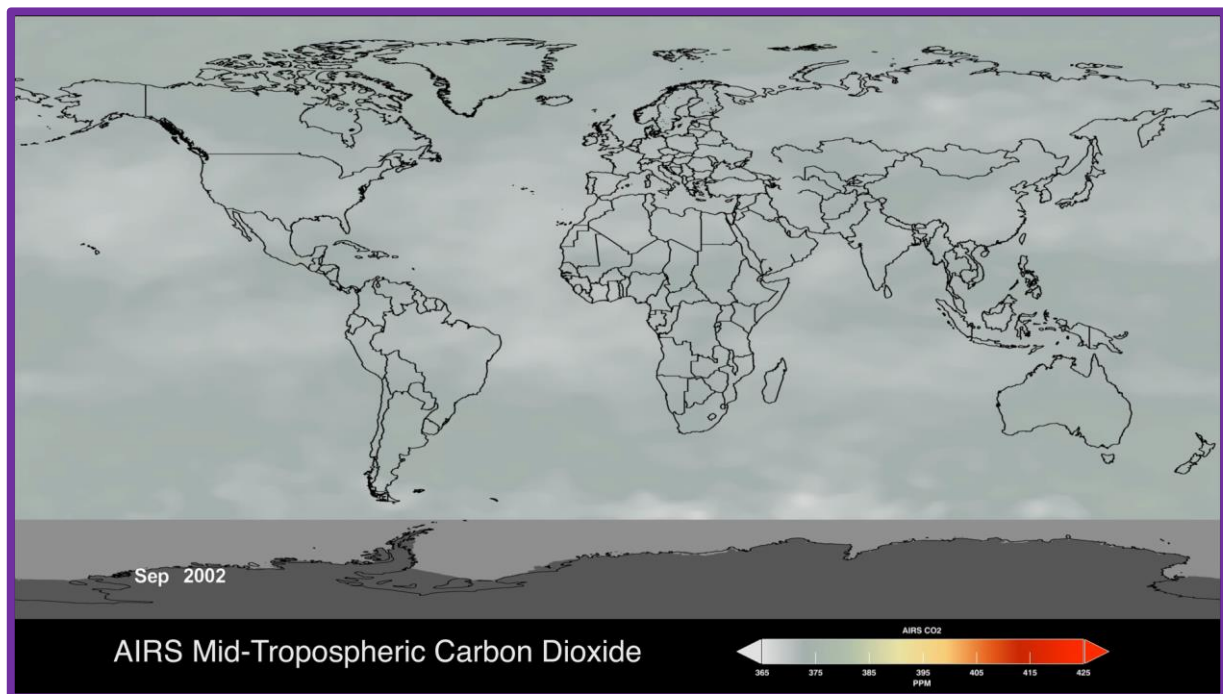


- On présente des satellites de mesure du CO<sub>2</sub> :
  - OCO 2 (2014) et OCO 3 (mai 2019) :  
Spectromètres embarqués qui mesurent la luminance pour certains canaux IR caractéristiques de l'absorption du CO<sub>2</sub>



- Microcarb (2021) :  
Objectif : Suivi et caractérisation des flux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (absorption / émission selon les régions). Système de mesure : Spectromètre à réseau IR passif, grande précision (1 ppm) et sur un pixel de base rectangulaire de 4,5 km par 9 km. Orbite circulaire héliosynchrone (650 km)

- On peut proposer une visualisation des données spatiales sur les émissions de CO<sub>2</sub> dans le temps

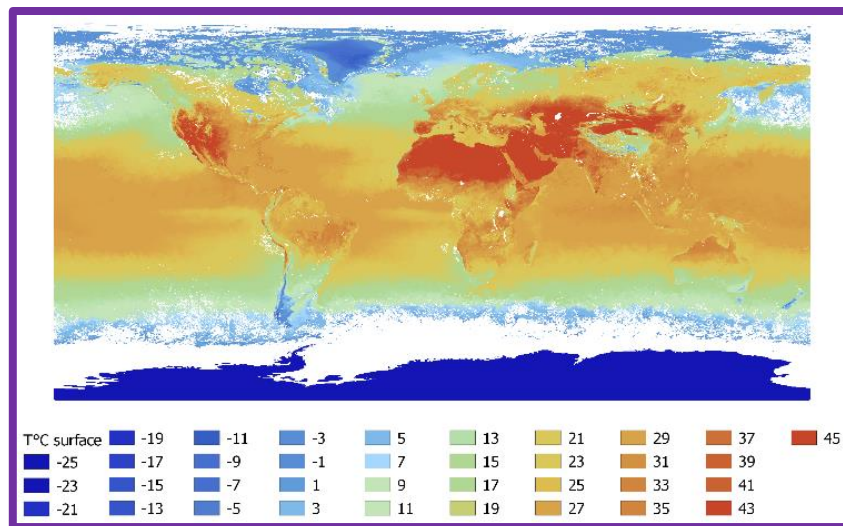


Commentaire : Les données spatiales montrent une corrélation mais pas la causalité

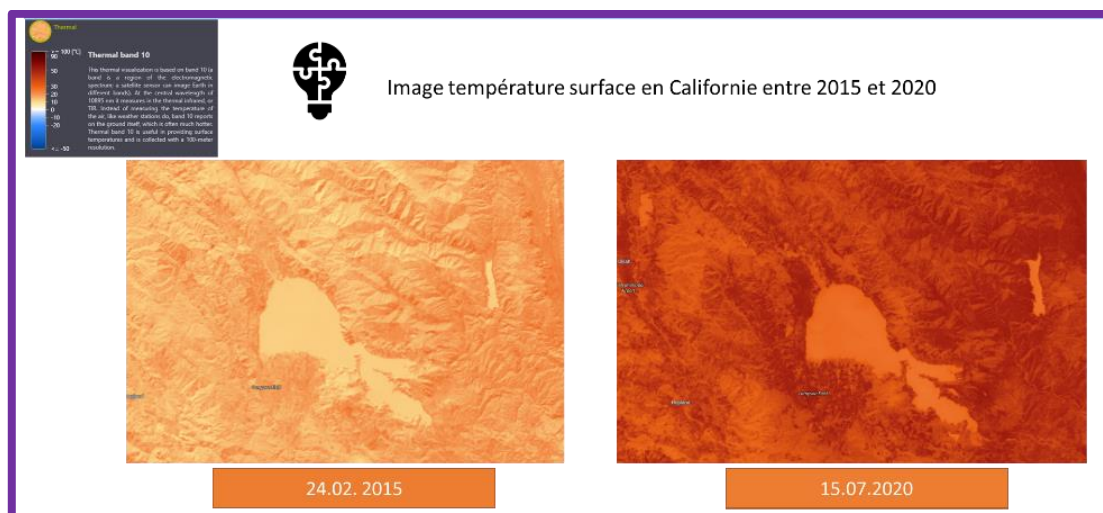
2. « Il existe un lien entre la quantité de CO<sub>2</sub> libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

➔ **L'apport du spatial : « L'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> entraîne une augmentation de la température »**

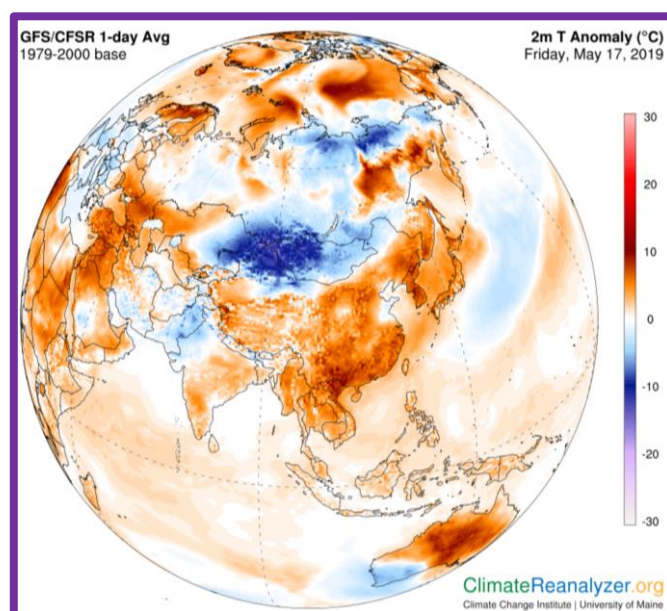
- Exploitation des températures de surface (SST) et leurs variations dans le temps mesuré par différents satellites et appliqué à des cartes du monde. Fichier exploitable sous QGIS, avec les « valeurs de température ». (1 pixel = 1 valeur mesurée).



- Observation des températures de surface avec approche comparative sur des visualisateurs comme Eo Browser. Mise en évidence de la saisonnalité. Distinction entre température de surface et température météorologique



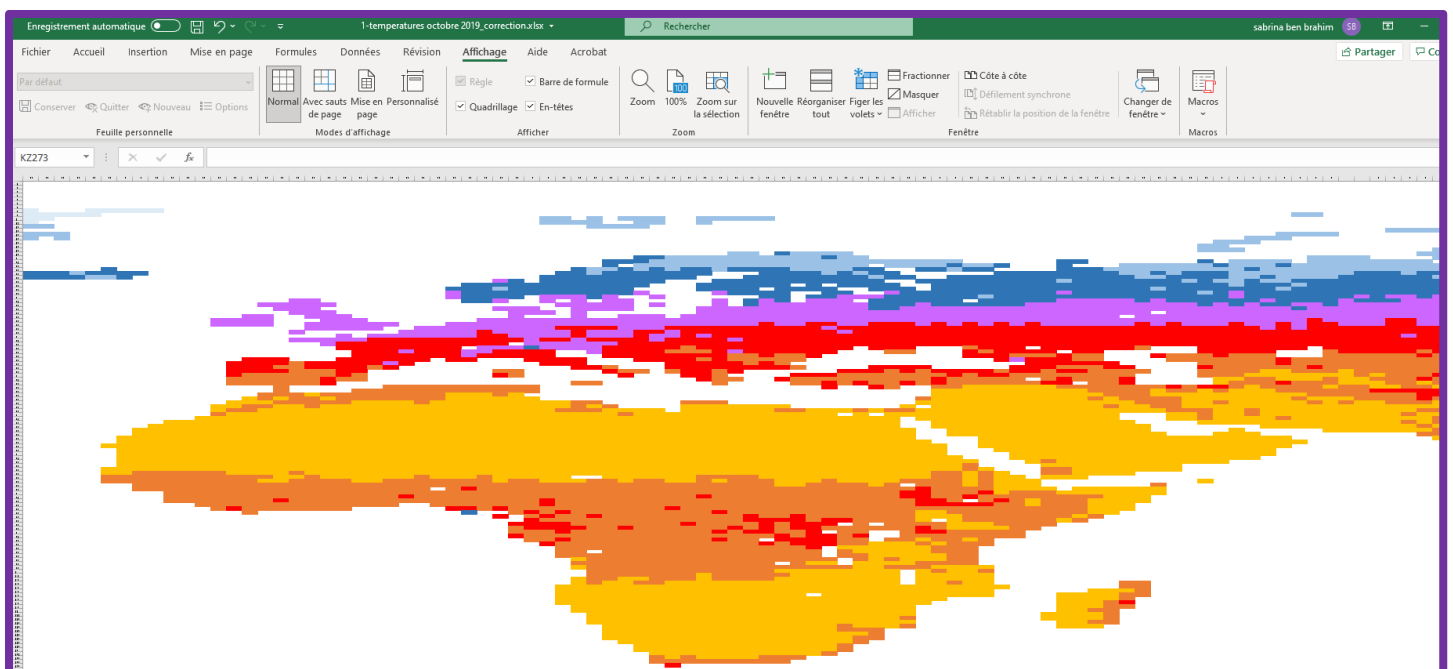
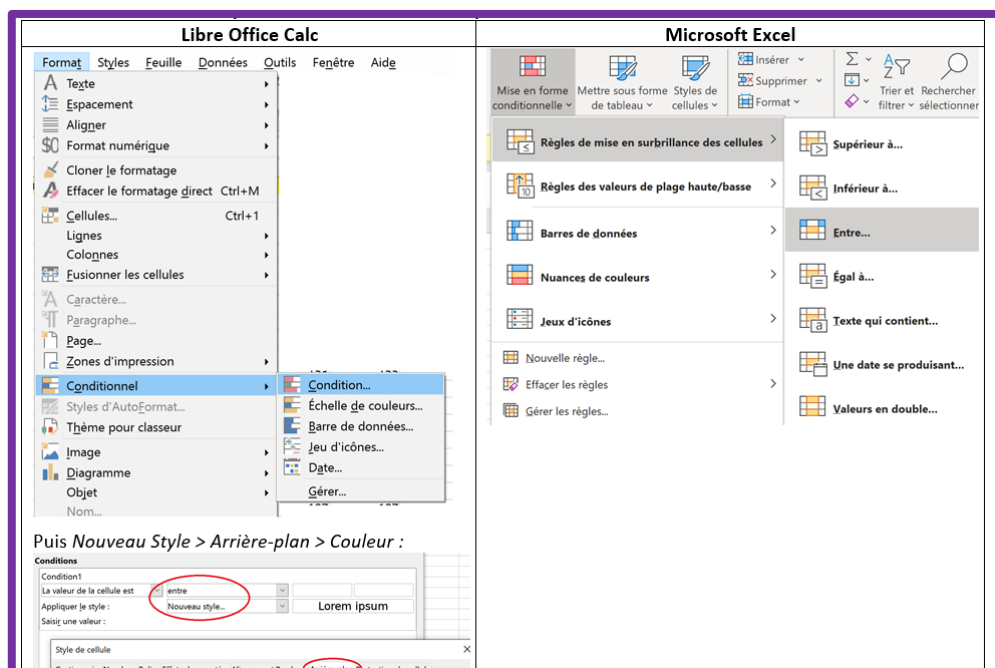
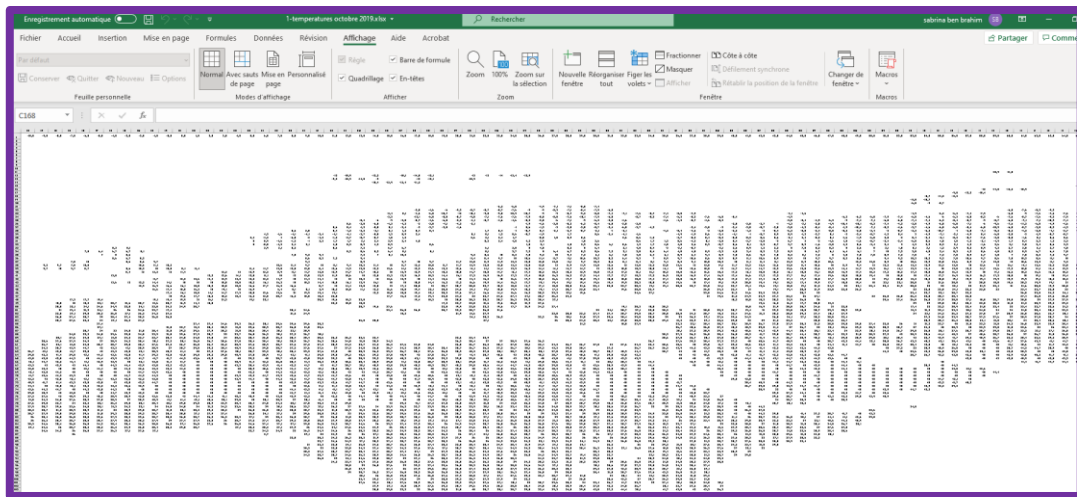
- Observation de modèles de températures



Source : <https://climatereanalyzer.org/wx/DailySummary/#t2>

Commentaire : Les données spatiales montrent une corrélation mais pas la causalité. Les données spatiales sont utilisées en revanche pour la construction de modèles

- Production d'une carte colorée de températures avec la fonction de mise en forme conditionnelle d'un tableur

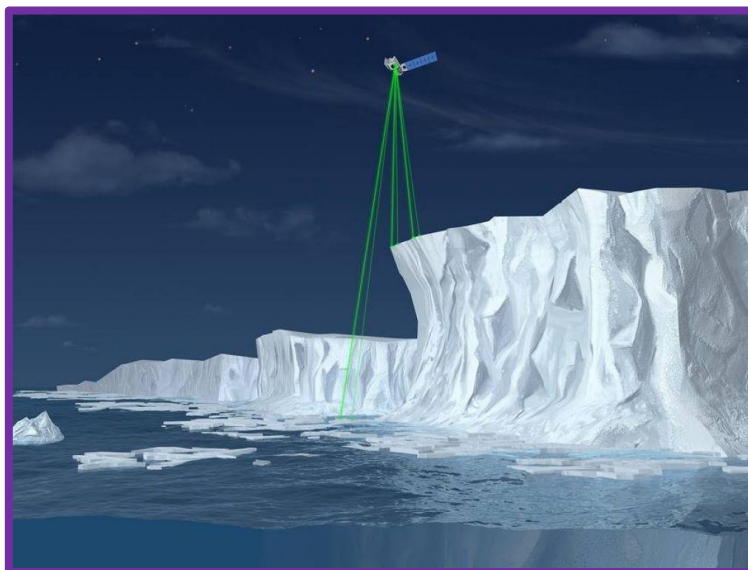




### 3. « Il existe un lien entre la fonte des glaces et la montée du niveau des eaux »

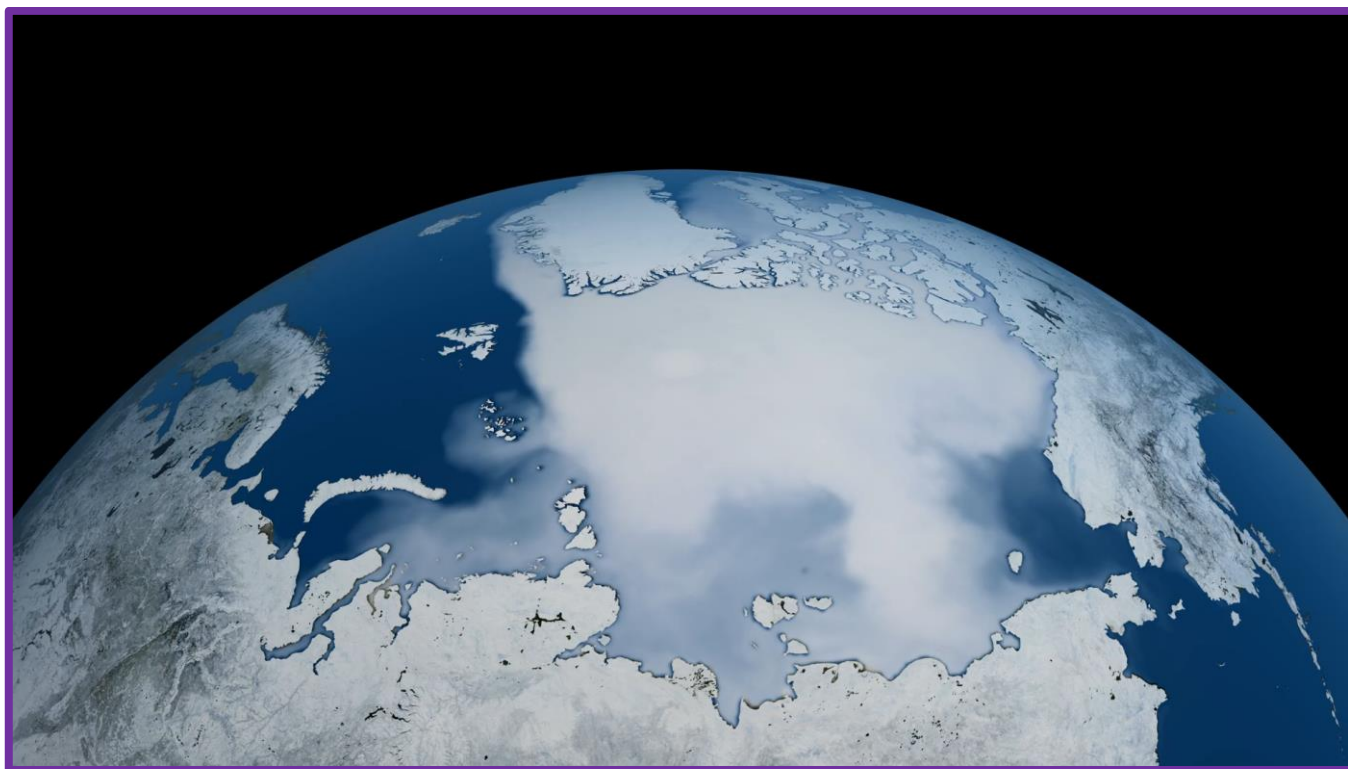
#### → L'apport du spatial : « Une surveillance particulière des pôles »

- Présentation de satellite de mesure des glaces : ICESat-2 : Satellite de la NASA mis en orbite en septembre 2018. A son bord : un altimètre spatial de type lidar ATLAS (Geoscience Advanced Topographic Laser Altimeter System). ATLAS est capable de détecter un changement annuel d'épaisseur de la banquise de 0,4 cm. La visualisation se termine en montrant la moyenne mensuelle de l'épaisseur de la glace de mer de novembre 2018 à mars 2019.



**Vidéo : le satellite Ice-sat 2**

- Une vue de l'océan Arctique avec une épaisseur mensuelle moyenne de glace de mer s'étendant de novembre 2018 à mars 2019. Les valeurs faibles sont représentées en bleu clair. Les valeurs plus élevées (5 mètres) sont représentées en magenta



**Credits: NASA's Scientific Visualization Studio**

Commentaire : On ne confond pas :

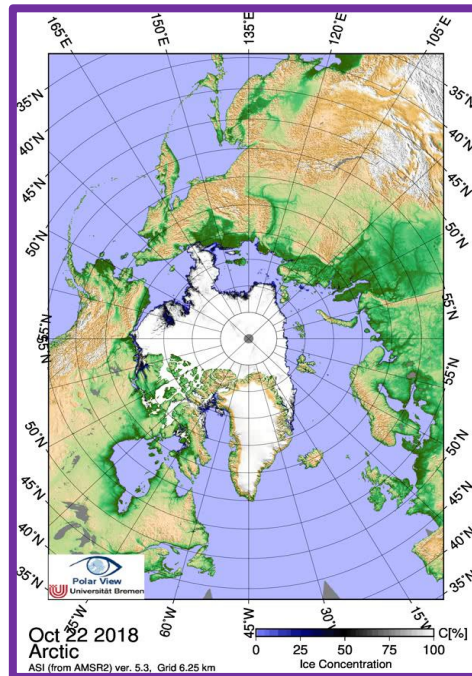
- Banquise : glace de mer
- Glaciers continentaux : calotte, inlandsis...

L'observation de l'étendue de la banquise par le spatial doit être analysé avec prudence :

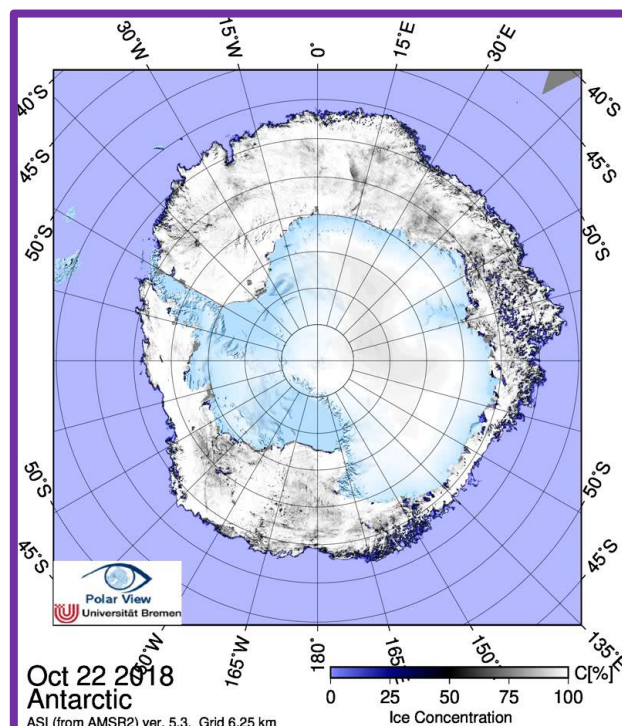
- Grande étendue mais saisonnalité
- Volume discutable
- Impact réel sur le niveau marin ?

→ **L'apport du spatial : « une inégalité des pôles »**

- Vidéo : Arctic sea ice coverage for the last 30 days

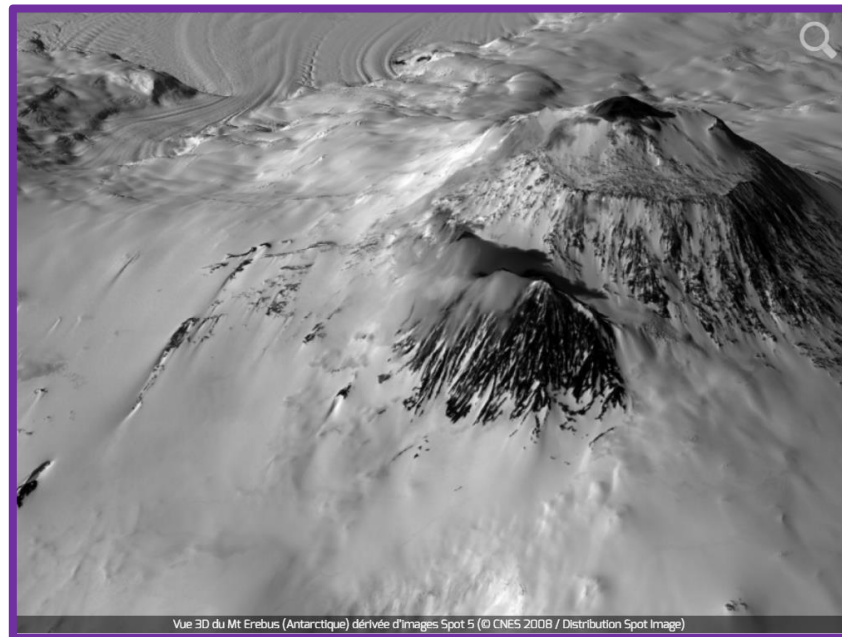


- Vidéo : Antarctic sea ice coverage for the last 30 days

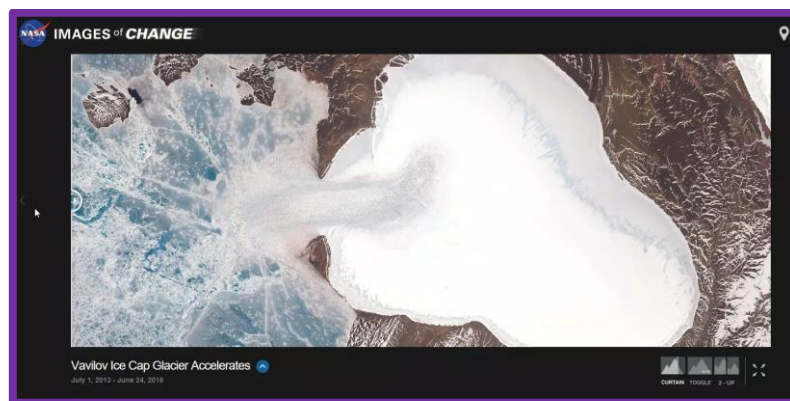


→ **L'apport du spatial : « On peut observer la fonte des glaciers continentaux »**

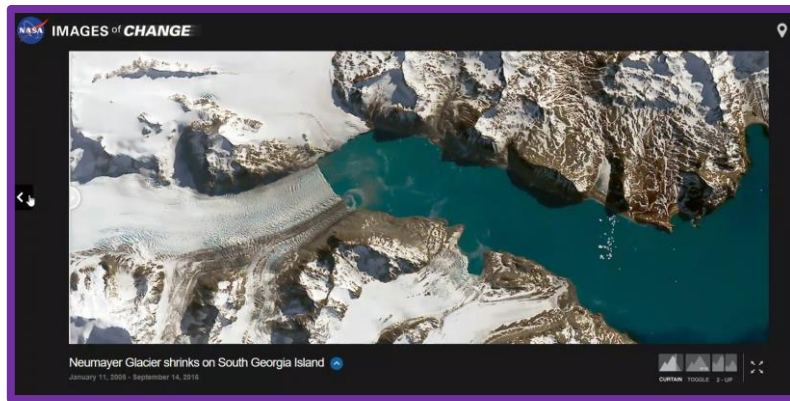
- Utilisation d'Images satellites et leurs traitements (SPOT 5 : résolution 2,5 m ; Pléiade : résolution 70 cm). Permettent de quantifier et de mesurer le recul et l'amincissement des glaciers. Des images haute résolution et des modèles numériques de terrain (MNT) permettent une nouvelle topographie des régions polaires. Le projet SPIRIT (Spot 5 Stereoscopic Survey of Polar Ice : Reference Images and Topographies) a été lancé afin d'établir une topographie de référence pendant la 4e année polaire internationale (API). Projet CNES



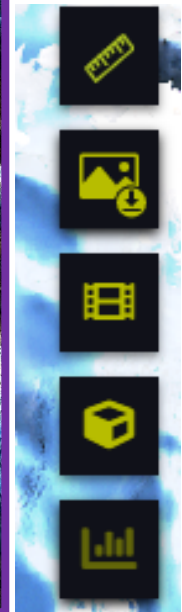
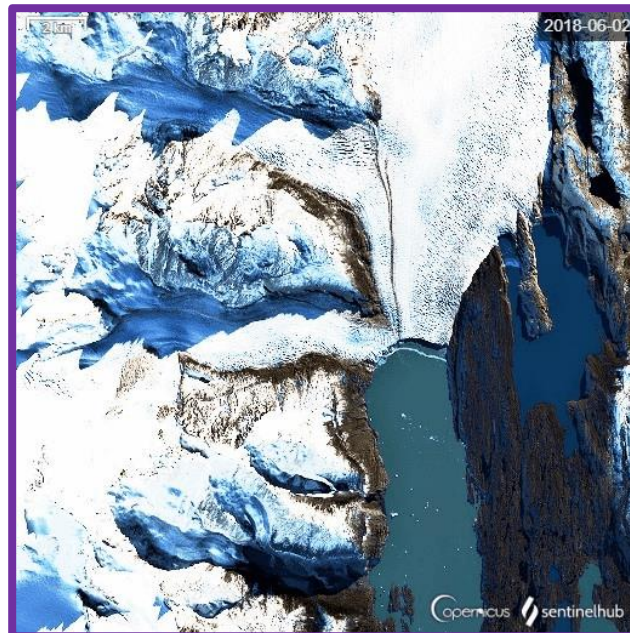
- Utilisation d'outils en ligne (split NASA) permettant d'observer l'évolution des glaciers



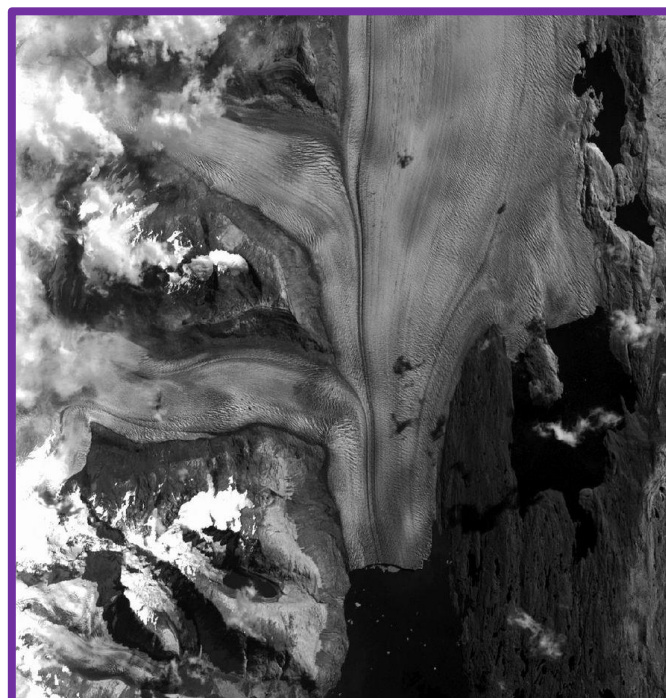




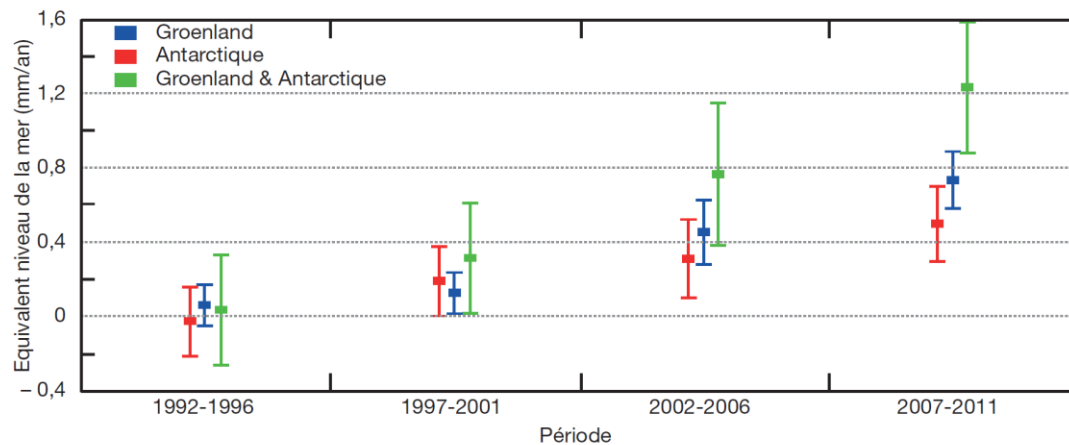
- o Visualisation par time-lapse de l'évolution de glaciers avec le visualisateur Eo browser



- o Observation et bilan de la fonte des calottes polaires



## FONTE DES CALOTTES GLACIAIRES

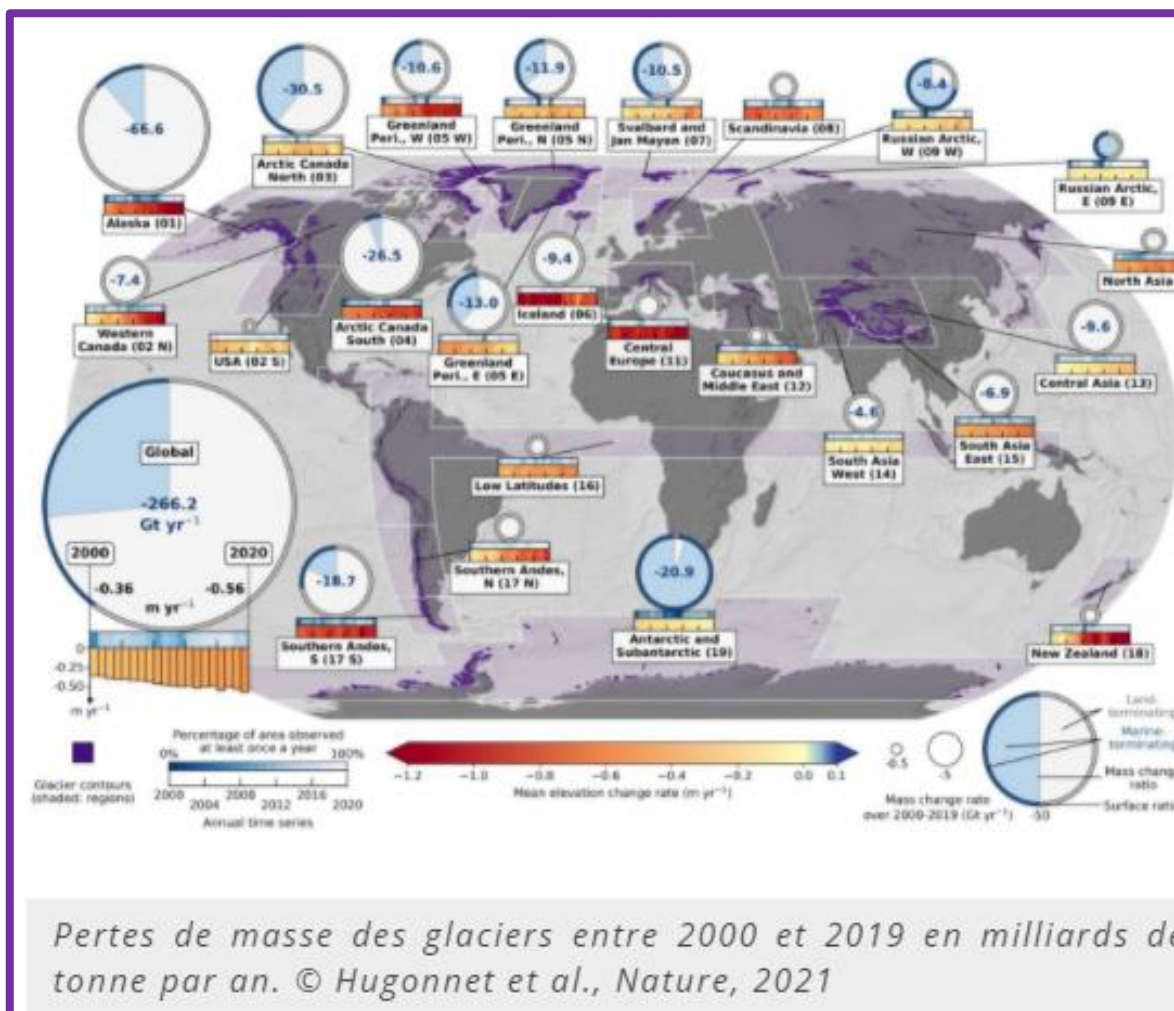


**Source :** Giec, 1<sup>er</sup> groupe de travail, 2013

La perte totale des glaces polaires continentales sur la période de 20 ans de 1992 à 2011 correspond à une montée du niveau des mers de 11,7 mm environ (8,4 à 15,1 mm). Les pertes les plus importantes ont été observées sur la dernière décade (2002-2012).

### ○ Bilan sur la cryosphère

Au cours des dernières décennies, la cryosphère a connu des changements importants et, parfois, spectaculaires. La fonte des glaciers de montagne et des petites calottes glaciaires s'est accélérée et des changements majeurs de la dynamique glaciaire ont été identifiés au Groenland et en Antarctique

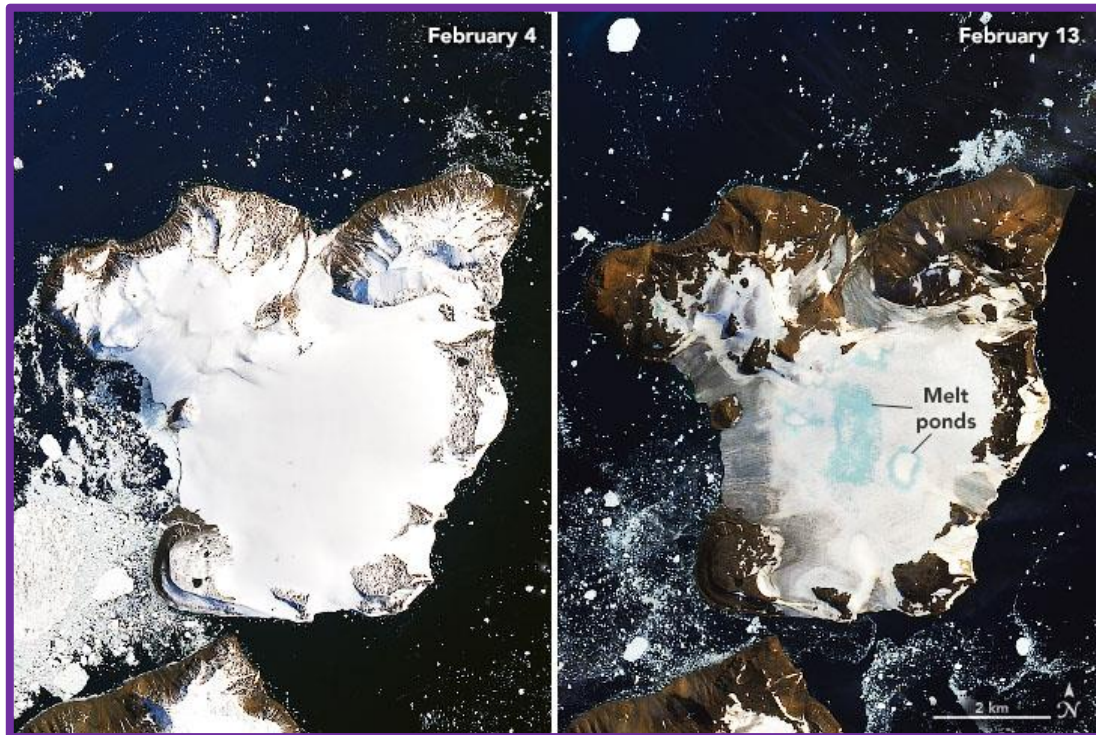


Pertes de masse des glaciers entre 2000 et 2019 en milliards de tonne par an. © Hugonnet et al., Nature, 2021

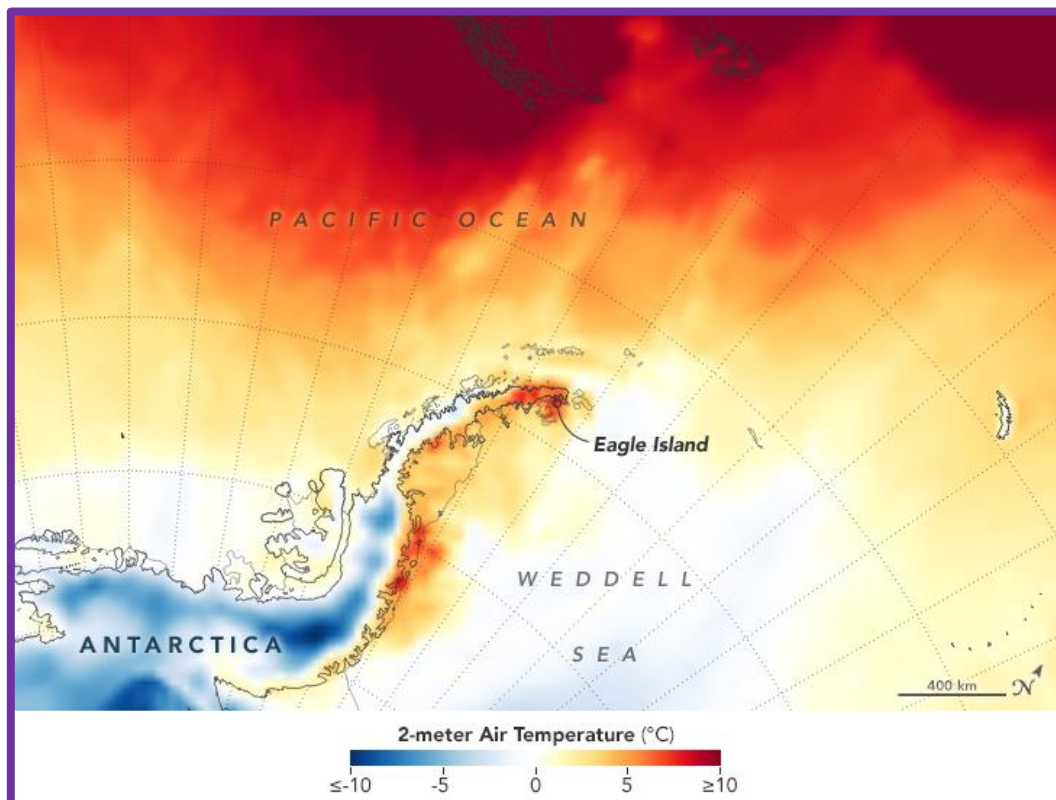


→ **L'apport du spatial : « Un lien établi entre l'augmentation de la température et la fonte des glaciers continentaux »**

- Le 6 février 2020, les stations météorologiques ont enregistré la température la plus élevée jamais enregistrée en Antarctique. Les thermomètres de la base d'Esperanza, à l'extrémité nord de la péninsule Antarctique, ont atteint 18,3 °C, soit à peu près la même température que à Los Angeles ce jour-là.



- Images illustre la fonte sur la calotte glaciaire de l'île Eagle, Acquisées par l'Operational Land Imager (OLI) sur Landsat 8 les 4 février et 13 février 2020. La carte a été dérivée du modèle du Goddard Earth Observing System (GEOS) et représente la température de l'air à 2 mètres au-dessus du sol. Les zones rouges les plus sombres sont l'endroit où le modèle montre des températures dépassant 10 °C





## ➔ L'apport du spatial : « Approche volumique »

- Réalisation d'une activité sur l'altimétrie radar et la mesure de l'épaisseur des glaces

### Démarche pédagogique choisie :

Les élèves réalisent différentes étapes pour construire, à l'aide du microcontrôleur, un télémètre.

- ➔ 1ère étape : Mesure de la célérité des ondes ultrasonores par une mesure de retard.
  - Les élèves utilisent le microcontrôleur.
- ➔ 2ème étape : Utilisation du microcontrôleur comme télémètre.
  - Exploitation de la relation entre célérité, retard et distance.
  - Modification du programme pour afficher la distance capteur-écran plutôt que le retard.
- ➔ 3ème étape : Exercice sur l'altimétrie radar

### Matériel nécessaire (1ère et 2ème étape)



Module ultrason Grove Microcontrôleur (carte Arduino<sup>TM</sup>) Fil de connexion

### Étape n°1 : Utilisation du logiciel Arduino IDE (avec affichage dans son moniteur série)

On utilise le logiciel Arduino IDE pour charger les programmes dans la carte et on observe les valeurs mesurées retard (durée d'un aller-retour) dans le moniteur série du logiciel.

### Étape n°2 : Réalisation du télémètre

On exploite la relation entre retard, célérité et distance pour modifier l'affichage et obtenir la distance

#### *Programme permettant la mesure et l'affichage du retard.*

```
1. //variables :
2. int ER = 4;           // broche où est l'ER ultrasons
3. int chrono;
4.
5. void setup()
6. {
7.   Serial.begin(9600); // vitesse de communication
8. }
9.
10. void loop()
11. {
12.   //émission d'un pulse de 10 µs
13.   pinMode(ER, OUTPUT); // paramétrage du module en sortie (émission)
14.   digitalWrite(ER, HIGH); //broche niveau haut : émission
15.   delayMicroseconds(10); //délai de 10 µs
16.   digitalWrite(ER, LOW); //broche niveau bas : fin d'émission
17.   pinMode(ER, INPUT); // paramétrage du module en entrée (réception)
18.
19.   //mesure de la durée
20.   chrono = pulseIn(ER, HIGH); // arrêt chronométrage quand on reçoit un signal
21.   Serial.print("durée de l'aller-retour :"); // écriture Durée :
22.   Serial.print(chrono); // écriture valeur du chronométrage
23.   Serial.println(" µs"); // écriture µs
24.   delay(1000); // délai de 1000 ms avant la mesure suivante
25. }
```

#### *Modification du programme précédent*

```
1. distance = celerite*chrono/1000000/2;
2. Serial.print("Distance :"); // écriture Distance :
3. Serial.print(distance); // écriture valeur distance
4. Serial.println(" m"); // écriture m
```

### Étape n°3 : Exercice (Source : ac-paris.fr)

La Nasa a récemment lancé un satellite avec à son bord l'altimètre laser ATLAS, le plus performant jamais placé en orbite, destiné à révéler l'ampleur de la fonte des glaces sur une Terre qui se réchauffe. La mission va récolter suffisamment de données pour mesurer les changements annuels d'épaisseur de la couche de glace au Groenland et dans l'Antarctique, même si ce n'est que de quatre millimètres à peine.

D'après <https://www.sciencesetavenir.fr/>

L'objectif de cet exercice est d'une part d'étudier les caractéristiques du laser et du mouvement du satellite et d'autre part d'étudier le lien entre la fonte des glaciers et le changement climatique.

#### Document 1 : L'altimètre Laser

Afin de calculer la distance entre le satellite et la surface de la Terre, l'altimètre ATLAS mesure la durée que met la lumière émise par le laser pour faire l'aller-retour entre le satellite et la surface terrestre.

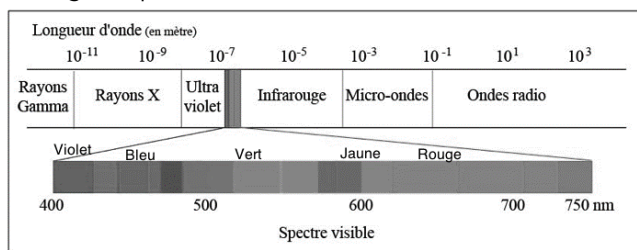
Le laser d'ATLAS émet des impulsions à la fréquence de 10 kHz à une longueur d'onde  $\lambda = 650$  nm. Grâce à cette fréquence incroyablement élevée, ATLAS peut prendre des mesures tous les 70 cm sur la calotte glaciaire.

Le satellite évolue à 500 km d'altitude, à la vitesse moyenne de 7 km/s et passe plusieurs fois par an au-dessus du même point de la surface du globe.

D'après le site de la Nasa

#### Données :

- Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \times 10^8$  m/s ;
- Masse de la Terre :  $M_T = 6,0 \times 10^{24}$  kg ;
- Rayon de la Terre (considérée sphérique) :  $R_T = 6\,400$  km ;
- Altitude de l'orbite du satellite :  $H = 500$  km ;
- Masse du satellite :  $m_s = 1387$  kg ;
- Valeur de la constante gravitationnelle :  $G = 6,67 \times 10^{-11}$  N.m<sup>2</sup>.kg<sup>-2</sup> ;
- Domaines du spectre électromagnétique :



- Multiples et sous-multiples :

Picoseconde	Nanoseconde	Microseconde
ps	ns	μs
$10^{-12}$ s	$10^{-9}$ s	$10^{-6}$ s

**Les quatre parties de l'exercice sont indépendantes.**

#### PREMIÈRE PARTIE : À PROPOS DU LASER

**Q1. (1,5 point)** Cocher la ou les bonnes réponses (une ou plusieurs réponses justes pour chaque question).

- a. La période  $T$  des impulsions du laser est :

- ☐  $1,0 \times 10^{-4}$  ms
- ☐  $1,0 \times 10^{-1}$  s
- ☐  $1,0 \times 10^{-4}$  s
- ☐  $1,0 \times 10^2$  μs

- b. La lumière émise par le laser est :

- ☐ Bleue visible
- ☐ Rouge visible
- ☐ Infrarouge
- ☐ Ultraviolette

## DEUXIÈME PARTIE : INTERACTION GRAVITATIONNELLE

**Q2.** Sur un schéma représentant la Terre et le satellite, tracer (sans souci d'échelle) le vecteur noté  $\overrightarrow{F_{T/S}}$  modélisant la force gravitationnelle exercée par la Terre sur le satellite.

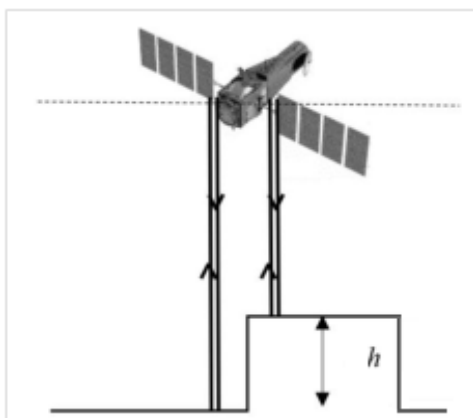
**Q3.** Donner l'expression littérale de l'intensité de la force gravitationnelle  $F_{T/S}$  exercée par la Terre sur le satellite en fonction de  $R_T$ ,  $H$ ,  $G$ ,  $m_s$  et  $M_T$ . Calculer sa valeur numérique.

**Q4.** Justifier que l'intensité de la force gravitationnelle exercée par la Terre sur le satellite est constante tout au long de l'orbite du satellite.

## TROISIÈME PARTIE : OBSERVATION ET PRÉCISION

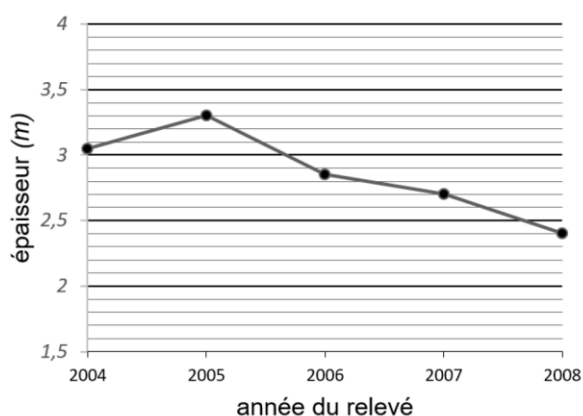
Avant ce lancement de la NASA, le dernier satellite à avoir étudié l'altitude de la surface de la calotte glaciaire a été mis en orbite en 2014. Cependant, il ne relevait l'altitude de la surface de la calotte glaciaire qu'une fois par an. Le document 3 présente l'évolution de l'épaisseur de la calotte glaciaire du continent Antarctique durant ses quatre années d'existence.

**Document 2 : Schéma de principe d'un satellite survolant un relief de hauteur  $h$**



*D'après le site de la Nasa*

**Document 3 : Évolution de l'épaisseur de la calotte glaciaire antarctique.**



*D'après le site de la Nasa*

**Q5.** Au moment où le satellite survole un dénivelé (variation de relief) de hauteur  $h$  (voir document 2), la durée mesurée par l'altimètre entre l'émission et la réception de l'impulsion laser correspond à la durée mesurée en absence de dénivelé à laquelle on soustrait une valeur  $\Delta t$ .

Cette variation  $\Delta t$  est la durée mise par le signal pour réaliser un aller-retour sur une hauteur  $h$ . Montrer que la valeur de  $\Delta t$  lorsque le satellite survole un dénivelé de hauteur de  $h = 1,0$  m est de  $6,7 \times 10^{-9}$  s.

La résolution de l'altimètre (taille du plus petit relief détectable) est directement liée à la précision du chronomètre (plus petit intervalle de temps mesurable) qui est embarqué sur le satellite.

**Q6.** Parmi les chronomètres suivants indiquer, en exploitant le document 3, celui ou ceux qui ont pu être utilisés à bord du satellite pour détecter les variations de l'épaisseur de la calotte glaciaire sur le continent antarctique entre l'année 2006 et 2007.

	Chronomètre 1	Chronomètre 2	Chronomètre 3	Chronomètre 4	Chronomètre 5
Précision	1 ms	1 $\mu$ s	1 ns	0,1 ns	0,01 ns

*L'élève est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie même si elle n'a pas abouti.*

*La démarche suivie et les étapes de résolution sont évaluées et nécessitent d'être correctement présentées. Des calculs sont nécessaires.*



## QUATRIÈME PARTIE : CHANGEMENT CLIMATIQUE ET COURANTS MARINS

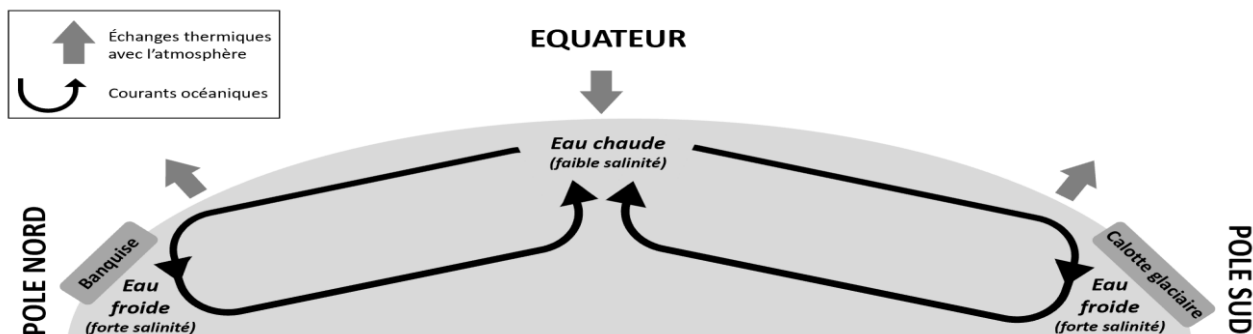
### Document 4. Le rôle de la circulation océanique dans la régulation du climat

**La circulation océanique joue un rôle clé dans la régulation du climat, en assurant le stockage et le transport de l'énergie thermique.**

Dans les océans, les eaux profondes, comme les eaux de surface, se déplacent et créent de puissants courants océaniques. Les différences de température et de salinité au sein des masses d'eau océaniques sont à l'origine de ces courants. La densité de l'eau de mer dépend en effet de sa température et de sa salinité.

Les eaux, très salées, arrivant aux pôles se refroidissent et plongent. Ces eaux profondes se déplacent vers l'Équateur. Elles sont alors réchauffées et moins salées et remontent à la surface. Ces eaux de surface se déplacent vers les pôles où elles se refroidissent à nouveau, et ainsi de suite.

La fonte de la calotte glaciaire pourrait modifier localement la circulation océanique, ce qui accentuerait le changement climatique.



D'après [https://ocean-climate.org/?page\\_id=3811](https://ocean-climate.org/?page_id=3811)  
<http://accs.ens-lyon.fr/accs>

La salinité d'une eau représente la masse totale de sels dissous (en grammes) par litre d'eau salée. Elle s'exprime en g/L.

**Q7.a.** Les « sels de mer » sont constitués en majorité par les ions chlorure et par les ions sodium, mais aussi les ions sulfate, magnésium, calcium, potassium, iode, etc.

Sachant que le numéro atomique du chlore vaut  $Z(\text{Cl}) = 17$ , déterminer la formule de l'ion chlorure en expliquant votre démarche.

**Q7.b.** Le chlorure de magnésium  $\text{MgCl}_2$  solide est composé d'ions magnésium et d'ions chlorure. Dédurre de la question précédente la formule des ions magnésium.

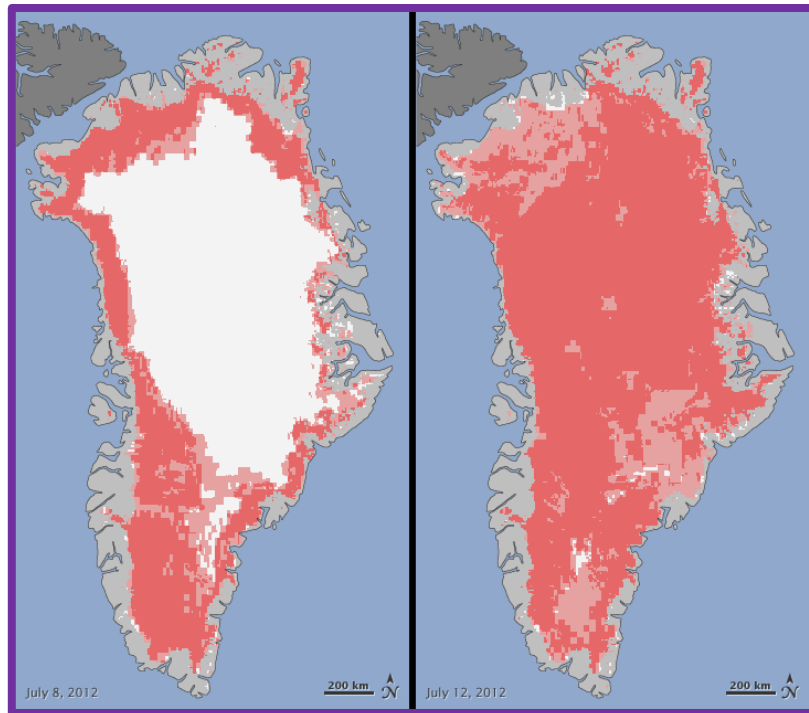
**Q8.** On trouve les données suivantes :

- La salinité de l'eau issue de la banquise fondue est de 0,50 g/L à la température de 1°C
- La salinité de l'eau de mer qui arrive aux pôles est de 37 g/L à la température de 1°C

Montrer que, dans ces conditions, si 2,00 L d'eau de mer qui arrivent aux pôles se mélangent à 0,10 L d'eau issue de la fonte de la banquise, la salinité du mélange est de 35 g/L.

**Q9.** À l'aide du résultat précédent, proposer une explication à la phrase soulignée dans le document 4.

- Inlandsis groenlandais le 8 juillet (à gauche) et le 12 juillet (à droite). Les mesures effectuées à partir de trois satellites ont montré que le 8 juillet, environ 40 p. 100 de l'inlandsis avait subi un dégel à la surface ou à proximité. En quelques jours, la fonte s'était considérablement accélérée et on estime que 97 p. 100 de la surface de l'inlandsis avait dégelé le 12 juillet.

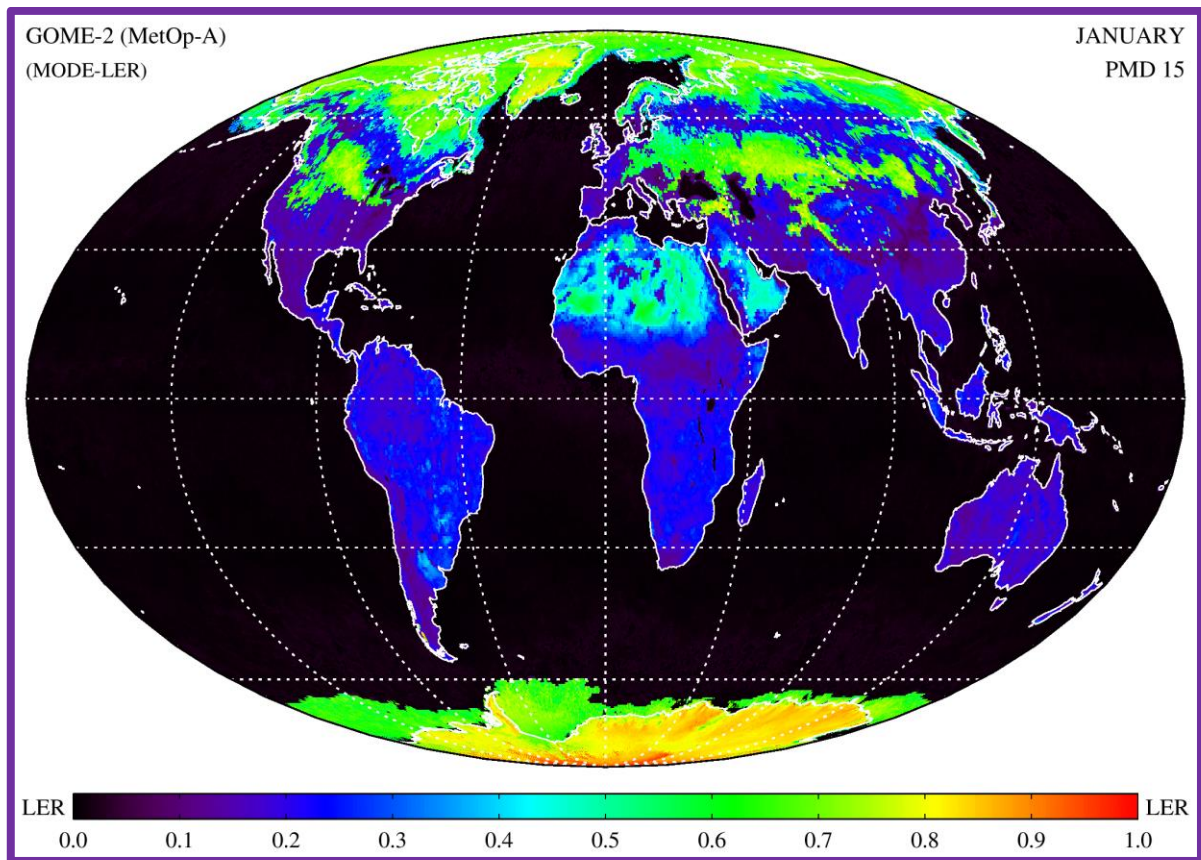


#### 4. « Il existe un lien entre la variation de l'albedo et la montée du niveau des eaux »

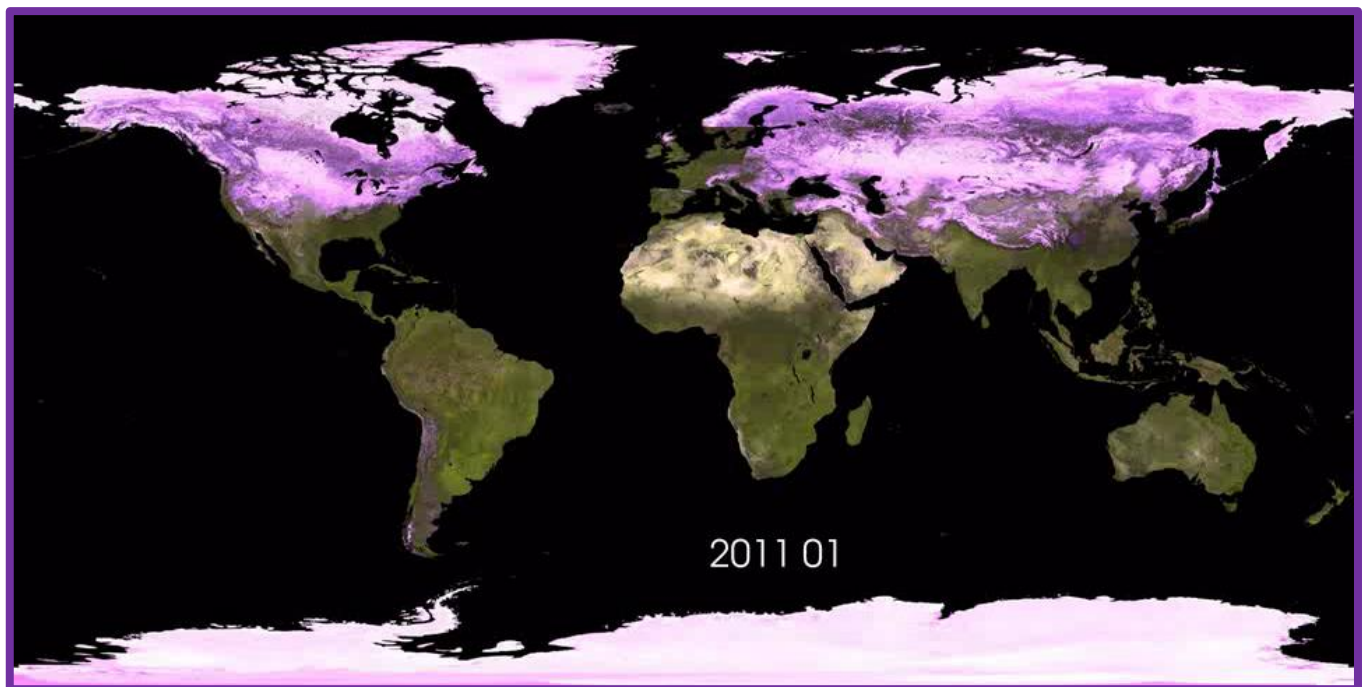
##### → L'apport du spatial : « les conséquences sur l'albedo »

- Le pouvoir réfléchissant d'une surface est appelé « albedo ». La neige et la glace brillantes ont un albedo élevé, ce qui signifie qu'elles absorbent très peu le rayonnement solaire et le réémettent vers l'espace, tandis que les surfaces plus sombres comme les forêts et les océans ont un albedo beaucoup plus faible. Plus l'albedo est bas, plus l'énergie solaire est absorbée. Les changements à la surface de la Terre, comme une diminution de la couverture glacée, peuvent donc affecter la quantité d'énergie solaire absorbée. Si la quantité d'énergie absorbée change, cela a un effet sur le budget énergétique de la Terre et affecte finalement le climat. MetOp est une famille de trois satellites météorologiques placés en orbite polaire héliosynchrone. GOME-2 est un spectromètre à balayage qui capte la lumière réfléchiée par la surface et l'atmosphère de la Terre. Source: <https://www.esa.int/>





Relation entre albedo et occupation des sols





## 5. « Il existe un lien entre l'élévation de la température des océans et la montée du niveau des eaux »

### → L'apport du spatial : « La température des océans »

- Mesurer la température de surface de la mer (ou SST). Satellite Aqua : Aqua ou EOS PM-1 est une mission spatiale de la NASA lancée en 2002 pour étudier le cycle de l'eau c'est-à-dire des précipitations et des processus d'évaporation. Instrument : MODIS. Avantage, très facilement téléchargeable. Les élèves peuvent l'exploiter



## 6. La montée des eaux

### → L'apport du spatial : « Les îles victimes du réchauffement climatique »

On considère ici deux exemples fréquemment cités pour illustrer les manifestations de l'élévation du niveau marin à travers deux exemples d'îles ou archipel menacés.

## 1. Présentation des îles et du contexte médiatique

Le Monde

### Ghoramara, quand la mer monte

... deux mois durant, le quotidien rude des habitants de l'île de Ghoramara, à l'orée du golfe du Bengale, en Inde. "Un jour, cette île où ils sont ...

19 juil. 2013

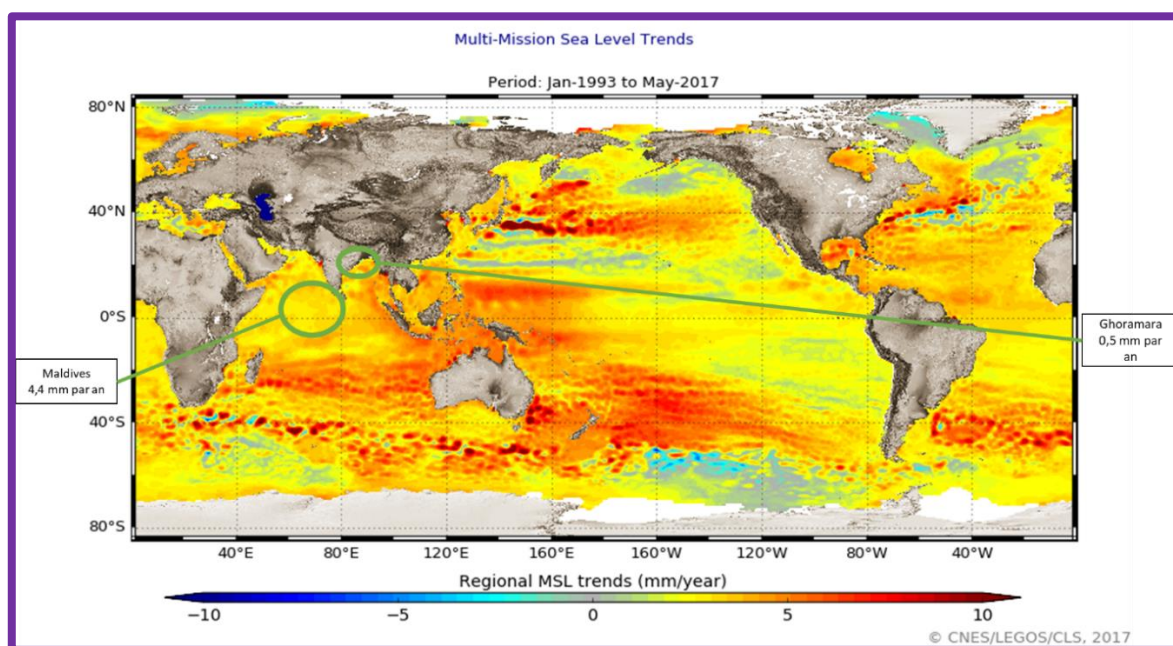


### Aux Maldives, les premiers réfugiés climatiques



Les habitants des Maldives seront-ils les premières victimes du réchauffement climatiques ? © Julienne Pham

## 2. Situation des îles au regard de la montée du niveau marin

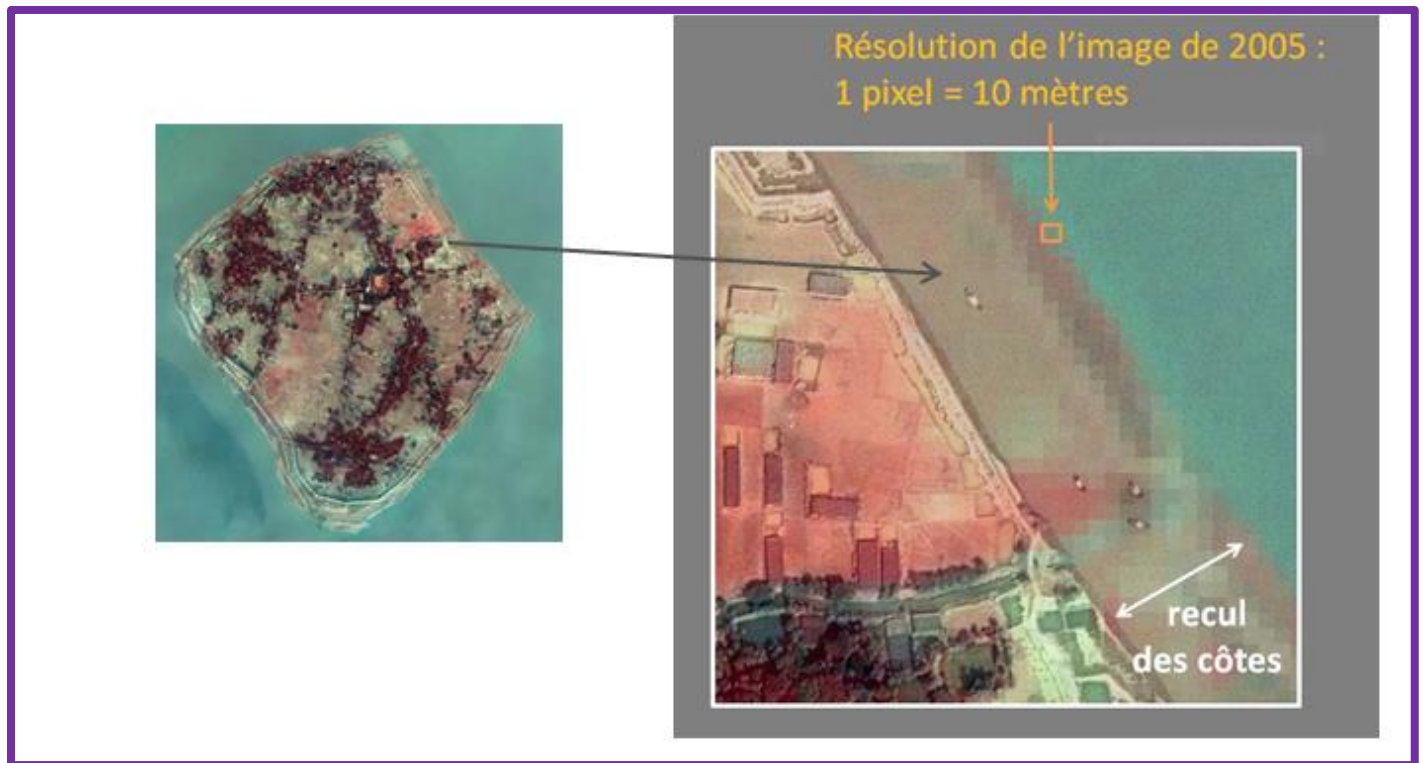


## 3. La situation de l'île de Ghoramara

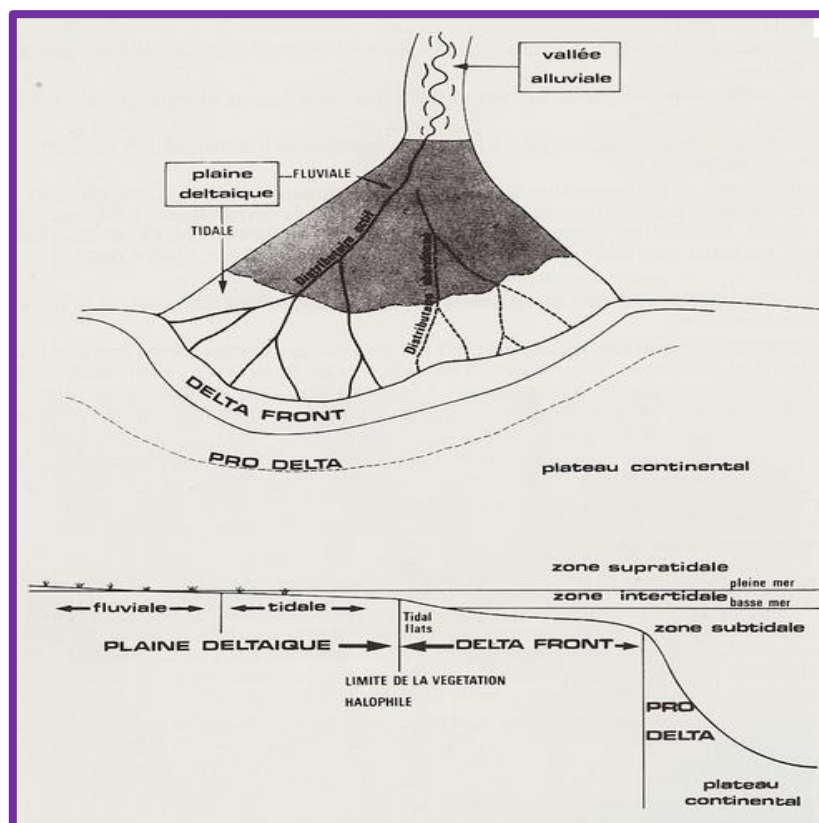
L'île de Ghoramara est devenue un exemple très souvent repris pour illustrer la question des conséquences des modifications de l'environnement. Il a en particulier fait l'objet d'articles de presse lors de la préparation de la COP 21.



- Mise en évidence par image satellite de la disparition de l'île : Superposition des photos SPOT entre 1989 et 2016 (site Airbus Defense and Space)



- Présentation du contexte géologique et discussion des impacts relatifs





#### 4. La situation de des Maldives : Montée des eaux et aménagement côtiers



Commentaire : Spécificité de l'écriture médiatique : l'appel à l'émotion. Importance des connaissances pour évaluer la pertinence d'une information : L'éducation à l'esprit critique ne peut pas être dissociée de l'acquisition de connaissances factuelles.

## 2. CYCLONES ET RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Pour cette activité on conduira une démarche en trois parties :

1. On cherchera à partir d'une expérience simple (voir simpliste) ou d'une série d'expérience à faire émerger une idée ou une problématique scientifique en lien avec le changement climatique
2. On procédera ensuite à une analyse critique des expériences et on établira un parallèle avec un raisonnement couramment utilisé dans les débats autour du changement climatique
3. On confrontera ensuite les savoirs scientifiques les plus récents aux problèmes soulignés par l'analyse critique et on montrera l'apport du domaine spatial dans cette contribution scientifique et dans la possibilité de répondre à la problématique scientifique

Chacune des 3 parties se traduit par une mise en activité et possiblement une production des élèves

### 2.1. Partie 1 : Expérience de modélisation d'un phénomène cyclonique

Le but de notre expérience est de recréer, à petite échelle, un courant d'air ascendant rendu visible par condensation de la vapeur d'eau présente et qui possédera un mouvement de rotation évoquant un cyclone. Considérons le support de l'expérience : construit un simulateur aux dimensions 75cm x 40cm ce qui permet d'avoir une grande surface d'évaporation et également un grand apport d'air. Ce simulateur est en bois et les fenêtres en plexiglas.

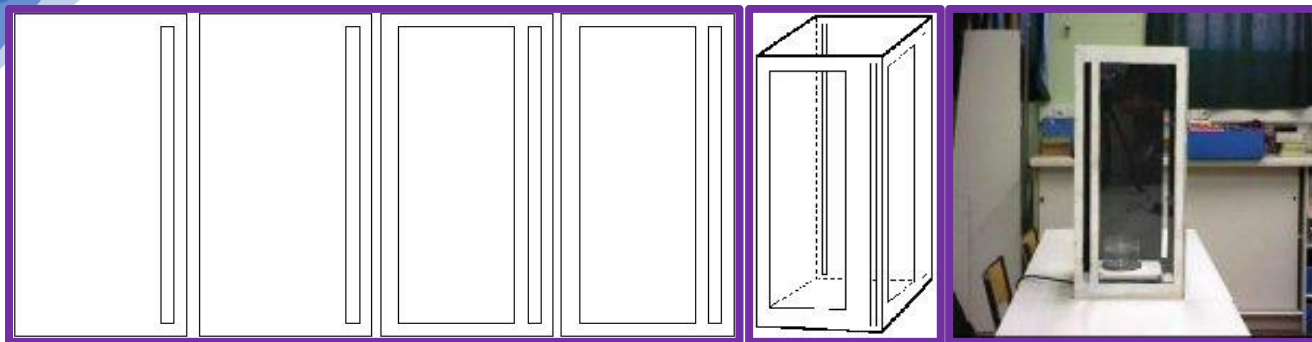


Figure 86 : Structure du support de la modélisation

L'air chaud ascendant est fourni une plaque chauffante. Sa visualisation est rendue possible par l'ajout d'un récipient contenant de l'eau et qui est porté à ébullition : la vapeur d'eau obtenue monte avec la colonne d'air et se condense en rencontrant de l'air froid qui génère l'apparition de gouttelettes d'eau qui rendent visible le flux ascendant



Figure 87 : Premiers résultats

En l'état une simple colonne d'air est visible, aucune rotation n'est observée. . Pour générer cette rotation, on réalise des fentes verticales au sein du dispositif en les positionnant de façon à générer des flux d'air horizontaux entrant dans la boîte par les angles et orienté de façon à générer une rotation directe

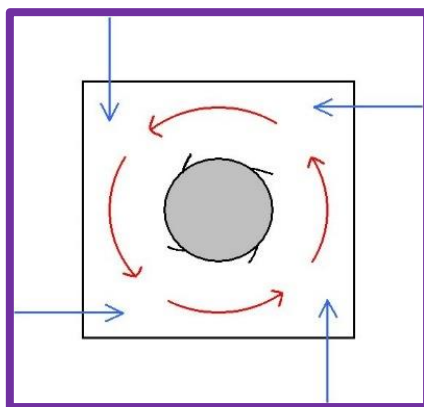


Figure 88 : Générer une rotation

La boîte originelle est surmontée d'une cheminée afin d'augmenter l'effet d'aspiration. Un dispositif d'éclairage y est fixé afin d'améliorer l'observation. Ces éléments mis en place on observe la naissance d'un flux d'air ascendant en rotation : c'est notre cyclone !



Figure 89 : Naissance d'un "cyclone"

## 2.1 Partie 1 : Faire émerger une problématique sur le changement climatique

De quoi ai-je eu besoin pour former un cyclone ?

- D'air chaud !
- D'un dispositif qui permet de canaliser le flux d'air ascendant
- D'un élément générant le mouvement de rotation

Les cyclones sont des phénomènes parfaitement visibles car constitués de nuages (ce qui ne serait pas le cas s'il ne contenait que de l'air). L'air chaud ascendant est donc particulièrement riche en vapeur d'eau qui par condensation formera les nuages. Les cyclones prennent systématiquement naissance au-dessus des océans. L'étude de leur trajectoire révèle que la force des vents décroît très rapidement si le cyclone atteint le continent.

La force de Coriolis est une pseudo force générée par la rotation terrestre, elle explique le mouvement de rotation des cyclones. La force de Coriolis est nulle à l'équateur

De quoi ai-je eu besoin pour former un cyclone ?

➔ D'une zone d'évaporation intense au niveau de l'océan et qui n'est pas située au niveau de l'équateur

**Hypothèse :** La formation des cyclones est favorisée par l'existence de zone océanique où la température de surface de l'eau est élevée, donc si la température de la Terre augmente, celle des océans aussi, donc il y a de plus en plus de zones où les cyclones peuvent se former : Le changement climatique favorise la formation des cyclones !

On peut exploiter l'expérience pour essayer d'appréhender les relations existant au sein du cyclone afin d'introduire les notions de pression, de gradient, et de vitesse des vents. On s'appuie sur l'observation suivante au sein du modèle : L'air chaud quitte le bas du dispositif pour remonter le long de celui-ci et s'en échapper au sommet

**Proposition :** Le nombre de molécule d'air diminue au dispositif au fur et à mesure que l'on chauffe celui-ci. Dans la zone de formation d'un cyclone, le nombre de molécule d'air diminue

La Pression atmosphérique est la force exercée par le poids des molécules d'air sur une surface donnée. Si le nombre de molécule diminue, la pression atmosphérique également. Dans la zone de formation d'un cyclone, la pression atmosphérique diminue. Au sein d'un cyclone le courant ascendant principal est situé au centre dans une zone appelée œil du cyclone. L'air ascendant est évacué latéralement en altitude et retombe ensuite générant des courants descendants et des zones avec plus d'air et donc des plus haute pression. De l'air d'altitude vient partiellement combler au sein de l'œil ce déficit d'air. Dans la zone de formation d'un cyclone, on observe la formation d'une importante différence de pression atmosphérique entre l'œil du cyclone et la périphérie. Les mouvements



ascendants et descendants structure le cyclone. On observe une corrélation entre la vitesse des vents observé au sein du cyclone et les variations horizontales de la pression

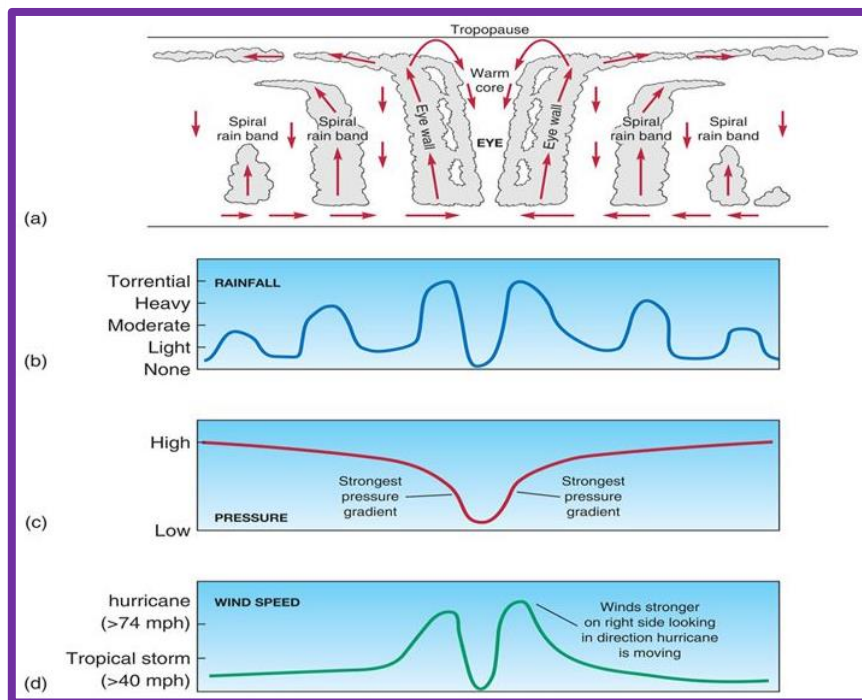


Figure 90 : Pression, vents, précipitations et cyclones

L'existence d'une différence de pression (gradient de pression) génère un flux d'air de la zone de haute pression (là où il y a le plus d'air) vers la zone de basse pression (là où il y a le moins d'air). Ce flux d'air c'est le vent ! Dans un cyclone, on observe un important gradient de pression à l'origine des vents associés au cyclone. Le flux d'air est centripète mais il est soumis à la force de Coriolis qui dévie son mouvement vers la droite. Cette déviation permanente engendre la rotation caractéristique des vents cycloniques. Dans la zone de formation d'un cyclone, on observe la formation d'un gradient de pression générant des vents. La vitesse des vents est liée au gradient de pression. Plus le gradient est élevé, plus la vitesse des vents augmente

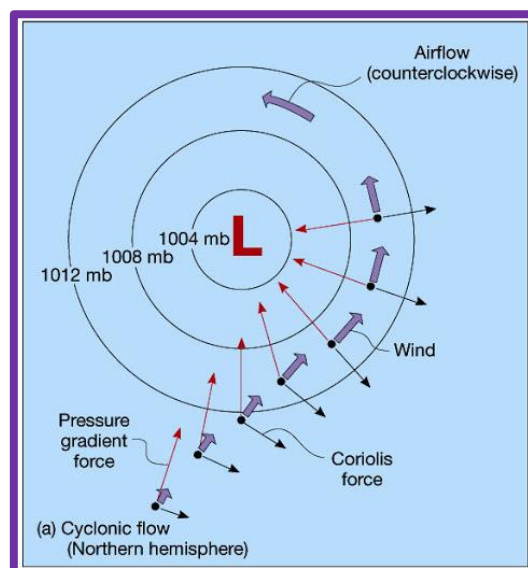


Figure 91 : Mise en place de la rotation de l'air au sein du cyclone

Hypothèse : La vitesse des vents du cyclone dépend de la différence de pression entre l'œil du cyclone et la périphérie. Une élévation de la température de l'océan favorise un flux ascendant plus intense, et donc une pression plus basse au cœur du cyclone et donc le changement climatique entraîne la formation des cyclones plus puissants !

Le modèle expérimental apparaît comme limité, il ne permet que de considérer la situation initiale conduisant à la genèse du courant ascendant à l'origine du cyclone. Il ne permet pas d'envisager les facteurs à l'origine du déplacement et de la stabilité du phénomène cyclonique. On ne considère pas ici d'autres facteurs décisifs sur l'activité cyclonique susceptibles d'être modifiés par le réchauffement climatique :

- ➔ L'intensité des précipitations : Mécanisme : air plus chaud qui peut contenir davantage d'eau (équation de Clausius Clapeyron)
- ➔ La vitesse d'intensification des cyclones : Mécanismes ??
- ➔ La vitesse de déplacement des cyclones : Mécanismes ???

Les informations complémentaires permettent d'attribuer un rôle décisif à la température de l'eau, et conduit à une idée simple (simpliste ?) sur l'influence du changement climatique sur la probabilité d'apparition des cyclones et sur leur éventuelle puissance

Le raisonnement suivi dans la démarche paraît assez robuste mais il n'intègre pas de nombreux éléments. Il a été régulièrement proposé par la communauté scientifique et repris dans l'opinion publique. Cependant si la communauté scientifique a toujours pris des précautions en insistant sur les incertitudes, cela n'a pas toujours été le cas des personnes désireuses de sensibiliser la population sur la menace que constitue le changement climatique

---

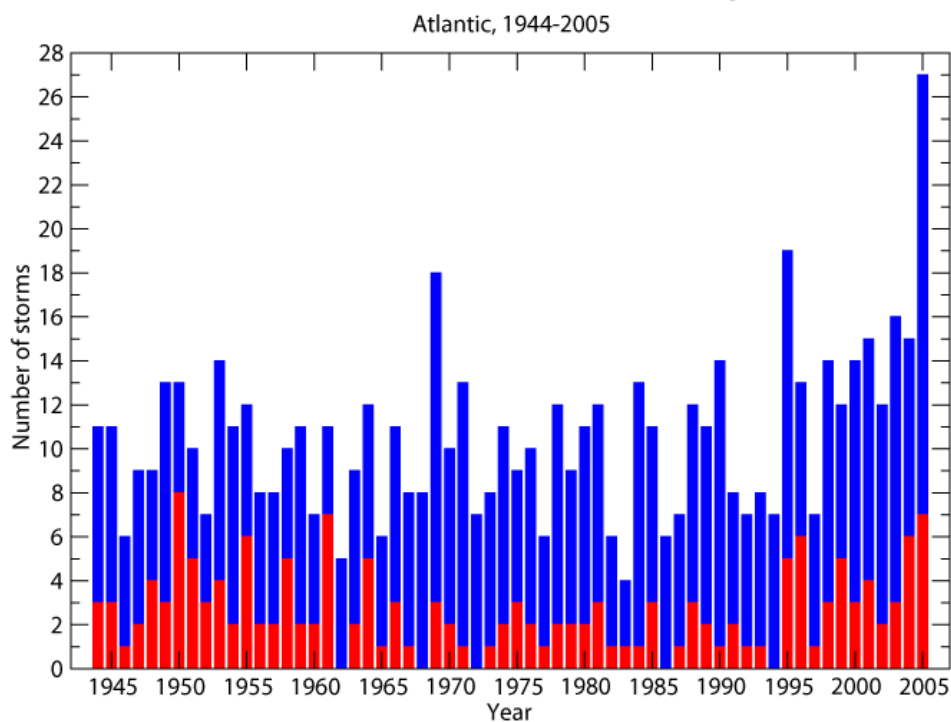
## 2.2 Partie 2 : Analyse critique : Relier l'activité cyclonique et le réchauffement climatique : l'exemple Katrina

On se propose une série de documents afin de montrer comment la perception des conséquences du réchauffement climatique peut être tributaire de certains événements exceptionnels. On prendra ici la situation qui a suivi l'année 2005 aux USA et qui s'était traduite par la multiplicité des événements cycloniques avec en point d'orgue le cyclone Katrina.

### 1. Une année cyclonique exceptionnelle : 2005

*La saison cyclonique 2005 de l'Atlantique a été celle des records. La totalité de la liste des 21 noms a été utilisée, puis les six premières lettres grecques, pour un total de 28, dépassant le précédent record de 21 cyclones enregistrés dans la saison cyclonique de 1933. Ce record n'a été depuis battu qu'une seule fois en 2020. Katrina a été le cyclone tropical le plus coûteux de l'histoire avec des dégâts estimés à au moins 80 milliards de dollars, battant le record de 26,5 milliards de l'ouragan Andrew en 1992. Wilma a été le plus puissant ouragan du bassin de l'Atlantique, avec une pression centrale de 882 hPa (18 octobre à 8 h EDT), battant l'ouragan Gilbert de 1988 (888 hPa) ; et a connu une baisse de pression de 98 hPa en 24 heures, dont 61 hPa en 6 heures. Wilma a également battu le record d'avoir le diamètre de l'œil le plus petit jamais observé dans l'Atlantique (3,7 km). Les inondations associées à l'ouragan Stan ont occasionné entre 1000 et 2000 décès dans l'Amérique centrale. La tempête tropicale Zeta a sévi à mi-chemin entre les années 2005 et 2006. La dernière fois qu'on avait observé ce phénomène remonte à la saison 1953-1954 (Ouragan Alice #2). L'ouragan Beta a été le premier ouragan majeur (de catégorie 3 ou plus) désigné par une lettre de l'alphabet grec. L'ouragan Vince a été le premier ouragan à avoir jamais touché les côtes européennes (péninsule Ibérique) et à s'être formé au large de l'Afrique du Nord. Les lettres V et W n'avaient jamais été utilisées pour nommer un cyclone, soit depuis 1950, année depuis laquelle les tempêtes ont été systématiquement nommées. Pour la troisième saison consécutive se sont formés des ouragans de catégories 5 (en 2004 s'était formé Ivan et en 2003, Isabel). Jamais ceci n'avait été observé. Une tempête subtropicale a été identifiée dans les analyses après la saison cyclonique. Cela met ainsi le record à 28 cyclones.*

## Annual Number of Named Storms and Major Hurricanes



### Vidéo 1 : Katrina retrospective 5 years later (NASA)



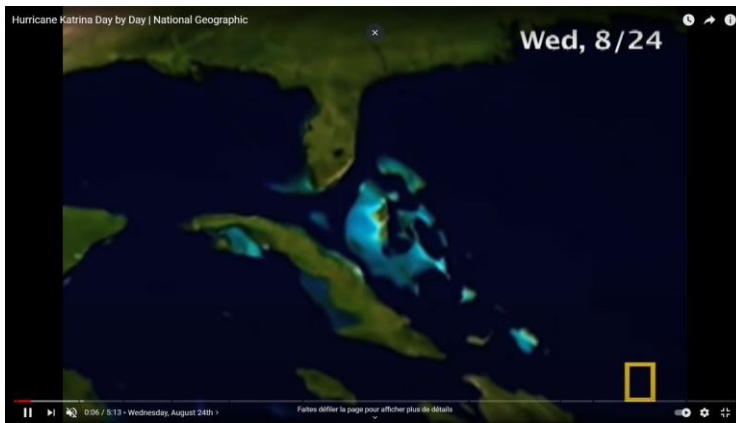
### Commentaire

L'année 2005 constitue pour le bassin Atlantique une année exceptionnelle, elle restera d'ailleurs sans comparaison jusqu'à l'année 2020. Elle cumule des records sur les caractéristiques et sur le nombre d'événements cycloniques. Le cyclone Katrina constitue un événement d'une intensité exceptionnelle et qui va frapper dramatiquement les USA

### 2. Katrina : un traumatisme pour les USA

### Vidéo 2 : Hurricane Katrina day by day (national Geographic)





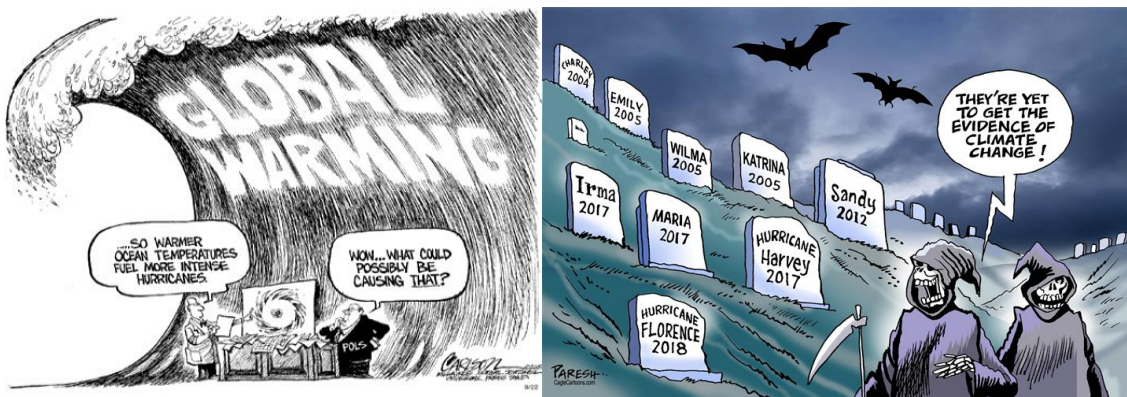
Vidéo 3 : La Louisiane après le passage du cyclone Katrina (Journal de France 2)



### Commentaire

Les deux vidéos montrent les conséquences dévastatrices du passage du cyclone Katrina sur la Louisiane et le traumatisme qu'il va constituer pour la population américaine

### 3. Le réchauffement climatique et Katrina



## *HURRICANE KATRINA'S REAL NAME*

**By Ross Gelbspan. New York times Aug, 31 2005**

*BOSTON – The hurricane that struck Louisiana and Mississippi on Monday was nicknamed Katrina by the National Weather Service. Its real name is global warming.*

*When the year began with a 2-foot snowfall in Los Angeles, the cause was global warming.*

*When winds of 124 miles an hour shut down nuclear plants in Scandinavia and cut power to hundreds of thousands of people in Ireland and Britain, the driver was global warming.*

*When a severe drought in the Midwest dropped water levels in the Missouri River to their lowest on record earlier this summer, the reason was global warming.*

*In July, when the worst drought on record triggered wildfires in Spain and Portugal and left water levels in France at their lowest in 30 years, the explanation was global warming.*

*When a lethal heat wave in Arizona killed more than 20 people in one week, the culprit was global warming.*

*And when the Indian city of Mumbai received 37 inches of rain in one day - killing 1,000 people and disrupting the lives of 20 million others - the villain was global warming.*

*As the atmosphere warms, it generates longer droughts, more intense downpours, more frequent heat waves, and more severe storms. Although Katrina began as a relatively small hurricane that glanced off southern Florida, it was supercharged with extraordinary intensity by the high sea surface temperatures in the Gulf of Mexico. The consequences are as heartbreaking as they are terrifying. Unfortunately, few people in America know the real name of Hurricane Katrina because the coal and oil industries have spent millions of dollars to keep the public in doubt about the issue. The reason is simple: To allow the climate to stabilize requires humanity to cut its use of coal and oil by 70 percent. That, of course, threatens the survival of one of the largest commercial enterprises in history. In 1995, public utility hearings in Minnesota found that the coal industry had paid more than \$1 million to four scientists who were public dissenters on global warming. And ExxonMobil has spent more than \$13 million since 1998 on an anti-global warming public relations and lobbying campaign. In 2000, big oil and big coal scored their biggest electoral victory yet when George W. Bush was elected president - and subsequently took suggestions from the industry for his climate and energy policies.*

*As the pace of climate change accelerates, many researchers fear we have already entered a period of irreversible runaway climate change. Against this background, the ignorance of the American public about global warming stands out as an indictment of the U.S. news media. When the American press has bothered to cover global warming, it has focused almost exclusively on its political and diplomatic aspects and not on what the warming is doing to agriculture, water supplies, plant and animal life, public health and weather.*

*For years, the fossil fuel industry has lobbied the news media to accord the same weight to a handful of global warming skeptics that it accords the findings of the Intergovernmental Panel on Climate Change - more than 2,000 scientists from 100 countries reporting to the United Nations. Today, with the science having become even more robust - and the impacts as visible as the megastorm that covered much of the Gulf of Mexico - the press bears a share of the guilt for our self-induced destruction with the oil and coal industries.*

*Where I live, in Boston, I am afraid that the coming winter will - like last winter - be unusually short and devastatingly severe. In early 2005, a storm knocked out power to thousands and dropped a record-setting 42.2 inches of snow on Boston. The conventional name of the month was January. Its real name is global warming.*

Greenhouse Gas Emissions

Global Warming

Air Mass Temperature Increase

Land Surface Temperature Increase

Sea Surface Temperature Increase

Glacier and Ice Sheet Melt

Thermal Expansion of the Ocean

Sea Level Rise

Coastal Flooding Increase

Storm Surge Increase

Intense Atlantic Hurricane Frequency Increase

Wind Damage Risk Increase

Runoff and Flood Risk Increase

Extreme Precipitation Increase

Atmospheric Moisture Increase

Hurricane Katrina 2005

La violence de Katrina entraîne un saisissement de l'opinion américaine qui conduit à la recherche de coupable, le changement climatique jusque là très peu présent dans la société américaine est pointé du doigt. La mécanique proposée est assez simple et relie la puissance et la fréquence des cyclones à la température de l'océan. La large médiatisation du film de Al Gore « Une vérité qui dérange » diffuse très largement cette mécanique et prédit son intensification à venir



#### 4. Un débat qui s'installe mais où persiste l'idée du lien probable



L'augmentation de la température a-t-elle des effets sur les ouragans ? C'est la question qui divise actuellement les chercheurs. *New Scientist* fait le point sur ce débat agité et plein de rebondissements.

Que se passe-t-il, au juste ? Les cyclones se font-ils plus dévastateurs sous l'effet du réchauffement climatique ? Il n'y a pas si longtemps, les experts étaient unanimes. La recrudescence des ouragans dans l'Atlantique s'inscrivait dans un cycle à long terme parfaitement normal ; rien n'indiquait que le réchauffement augmentait leur puissance et leur fréquence où que ce soit dans le monde. Quant à l'avenir, on n'en savait rien parce que les modèles ne permettaient pas de prédire les effets du changement climatique sur les tempêtes tropicales. Tel était le consensus officiel en 1996. Deux ans plus tard, certains chercheurs de pointe, comme William Gray, de l'université d'Etat du Colorado, et Kerry Emanuel, du Massachusetts Institute of Technology (MIT), sont même allés un peu plus loin. Dans un article publié en 1998 dans le *Bulletin of the American Meteorological Society*, ils concluaient qu'un doublement du niveau de dioxyde de carbone dans l'atmosphère n'affecterait ni la fréquence des cyclones tropicaux, ni les zones qu'ils touchent et n'accroîtrait leur intensité que de 10 % environ.

Ce consensus a aujourd'hui volé en éclats. Plusieurs publications remettent en question toutes ces suppositions et affirment que l'élévation de la température au cours des trente dernières années a d'ores et déjà accru la force des ouragans. Ceux-ci ne sont pas plus fréquents mais plus intenses ; leurs vents et les précipitations qui les accompagnent sont plus forts, leur durée est plus longue et leur trajectoire encore moins prévisible qu'avant. Et le pire est peut-être à venir. "La poursuite du réchauffement risque d'accroître le potentiel destructeur des cyclones tropicaux et, avec l'accroissement des populations côtières, d'augmenter de façon substantielle le nombre des victimes dues aux ouragans au XXI<sup>e</sup> siècle", écrit Kerry Emanuel, qui prend désormais un ton bien plus alarmant et se dissocie de son ancien collègue. Ce genre de déclaration a provoqué un schisme parmi les grands prêtres de la prévision des cyclones. Alors, qui a raison ?

Il se produit chaque année dans le monde environ 85 tempêtes tropicales, dont environ les deux tiers atteignent le stade du cyclone. Si leur nombre ne varie pas énormément d'une année sur l'autre, il n'en va pas de même de leur répartition. Quand la situation est favorable à la formation d'ouragans dans l'Atlantique, elle y est défavorable dans le Pacifique et vice versa. L'Atlantique a été très très agité cette année, mais le Pacifique relativement calme. Le centre mondial de l'activité cyclonique se situe dans l'ouest du Pacifique Nord, où se produisent plus du tiers de l'ensemble des ouragans. Le Japon a, à lui seul, été frappé par dix typhons (le nom local de l'ouragan) en 2004, soit trois fois le nombre habituel.

Les cyclones tropicaux commencent avec une masse nuageuse qui se forme quand de l'air chaud et humide s'élève à la surface d'un océan tropical. Au fur et à mesure qu'il s'élève, la vapeur d'eau se condense et libère une énergie latente qui réchauffe l'air et l'envoie encore plus haut. C'est cette énergie latente qui provoque la formation des ouragans. Si la masse nuageuse est suffisamment grande, elle peut constituer ce qu'Emanuel appelle une "colonne" d'air humide, laquelle s'étend de la surface de l'océan jusqu'à la limite de la stratosphère. La zone de basse pression à la base de la colonne aspire de l'air supplémentaire, qui accumule de l'énergie à la surface de la mer et en relâche au fur et à mesure qu'il s'élève, ce qui fait encore baisser la pression. Si l'on se trouve à plus de 4° au nord ou au sud de l'équateur, la force de Coriolis - force centrifuge induite par la rotation de la Terre - met le cyclone en rotation. Si les conditions sont favorables, un cyclone tropical gagne rapidement en force. La vitesse des vents augmente et la dépression se transforme en tempête puis en ouragan. Sa puissance est alors énorme. Selon les calculs de Chris Landsea, de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des Etats-Unis, à Miami, un ouragan classique

*peut libérer plus de 1 milliard de milliards de joules par jour, l'équivalent d'environ 1 million de bombes de type Hiroshima. Heureusement pour nous, la plus grande partie de cette énergie sert à déplacer l'air vers le haut et non sur les côtés.*

*A première vue, le réchauffement climatique ne peut qu'aggraver les choses. La colonne d'air humide ne se forme en général que quand la température à la surface de la mer est supérieure à 26 °C. Si les océans se réchauffent, les zones dépassant ce seuil seront plus étendues. Et tout dépassement de ce seuil semble accroître la force des ouragans. Quand l'ouragan Katrina a atteint la catégorie 5, au mois d'août 2005, la température tournait autour de 30 °C à la surface du golfe du Mexique. Voilà pourquoi certains considèrent que, avec le réchauffement, on aura davantage de cyclones, qu'ils seront plus forts et qu'ils toucheront également des lieux qui n'en connaissent pas actuellement. Mais le monde n'est pas aussi simple. Comme William Gray, l'un des fondateurs de la science des ouragans, l'a fait remarquer, un cyclone ne peut se former que si un ensemble de conditions atmosphériques sont réunies. La différence entre la température de la mer et celle de l'air qui est au-dessus constitue l'une d'entre elles. C'est elle qui provoque les courants de convection indispensables à la formation des premiers nuages de tempête. Si, comme le suggèrent les modèles informatiques, le réchauffement climatique élève la température moyenne aussi bien dans la haute atmosphère qu'à la surface des océans, il faudra que celle-ci soit encore plus chaude pour qu'il y ait des ouragans et le potentiel générateur des tropiques restera sensiblement le même.*

*Il y a d'autres complications. Même quand toutes les conditions sont réunies, un ouragan ne se déclenche pas sans une perturbation atmosphérique. Et, même s'il y en a une, la plupart des tempêtes tropicales se calment d'elles-mêmes sans atteindre le stade du cyclone. S'il est important de savoir si le réchauffement climatique provoquera les conditions nécessaires à la formation des ouragans, il est donc tout aussi essentiel de savoir s'il augmentera les probabilités qu'ils se déclenchent et, une fois formés, celles qu'ils s'apaisent. Il y a deux façons d'apaiser un cyclone. La première, c'est de lui supprimer son carburant - l'air chaud et humide provenant des eaux chaudes de l'océan. C'est évidemment ce qui arrive quand il passe au-dessus de la terre ferme. Mais c'est également possible en mer. Au fur et à mesure que la tempête croît en force, les vagues font remonter l'eau fraîche des profondeurs à la surface, qui refroidit. Cela suffit parfois à mettre fin à l'ouragan, en particulier s'il se déplace lentement. Un cyclone ne peut donc atteindre une forte intensité que si la mer est chaude jusqu'à des dizaines de mètres sous la surface. Katrina a gagné en force en se dirigeant vers La Nouvelle-Orléans parce que l'eau était chaude jusqu'à plus de 100 mètres de profondeur. Les effets du réchauffement climatique semblent ici évidents. Si la chaleur s'étend encore plus en profondeur dans les océans du monde, on aura les conditions idéales pour la multiplication des ouragans.*

*Mais il y a une autre façon d'apaiser les cyclones, qui pourrait bien avoir l'effet opposé. Les vents peuvent disperser la colonne d'air humide en y introduisant de l'air sec, ce qui empêche la formation de la masse orageuse, ou en étêtant les nuages. Il suffit de peu de vent pour réduire à néant un ouragan potentiel. Les modèles climatiques informatiques ne permettent pas de reproduire fidèlement des phénomènes à petite échelle comme les cyclones, mais la plupart suggèrent que le réchauffement accroîtra la vitesse du vent dans les couches supérieures de l'atmosphère, de telle sorte qu'elle dispersera les ouragans. Avec toutes ces incertitudes et ces contradictions, il n'est pas étonnant que les différents modèles prédisent tout et son contraire. Et le fait que les meilleurs modèles ne permettent pas vraiment de prédire les cyclones n'arrange rien. "Si nous pouvions comprendre pourquoi le monde enregistre environ 85 ouragans par an et non, par exemple, 200 ou 25, nous pourrions peut-être en savoir plus sur les effets probables du réchauffement de la planète", explique Peter Webster, du Georgia Institute of Technology, à Atlanta. "Sans cette compréhension, les prévisions ne sont que des extrapolations statistiques." Devant la somme des incertitudes, les chercheurs étaient jusqu'à récemment unanimes pour affirmer qu'il était impossible de prévoir avec exactitude, zone par zone, les conséquences du réchauffement climatique sur les cyclones. Sur l'ensemble du globe, la théorie et les modèles les plus récents ne prédisaient qu'un faible accroissement de leur intensité.*

*Kevin Trenberth, du National Center for Atmospheric Research, à Boulder, dans le Colorado, a été le premier à sortir des rangs. En octobre 2004, alors que l'Atlantique avait connu un nombre record d'ouragans, il affirmait que le réchauffement climatique avait déjà des effets. "La température élevée à la surface de la mer provoque des tempêtes plus intenses, ce qui est cohérent avec ce que nous constatons", expliquait-il, lançant ainsi la polémique. Furieux de ces déclarations, Chris Landsea, qui travaillait à l'époque avec Kevin Trenberth sur un chapitre du rapport du groupe de travail intergouvernemental sur le changement climatique (IPCC) consacré entre autres aux ouragans, a démissionné. "Je ne peux pas continuer à participer à un processus que je considère comme scientifiquement douteux et guidé par des idées préconçues", a-t-il écrit pour se justifier. En août 2005, Kerry Emanuel a publié une étude qui suggère non seulement que Trenberth avait raison, mais que la tendance est déjà bien plus marquée que ce qu'on imaginait. Après avoir épluché les statistiques sur l'intensité des ouragans des cinquante dernières années, Emanuel concluait que les derniers ouragans durent en moyenne 60 % plus longtemps et que la vitesse de leurs vents est de 15 % plus élevée. L'augmentation peut paraître faible, mais les dégâts causés par un cyclone ne sont pas directement proportionnels à la vitesse du vent, mais au cube de celle-ci. Ces résultats laissent donc entendre que la capacité destructrice d'un ouragan classique a augmenté de plus de 50 %. "Ce travail implique que l'activité cyclonique tropicale réagit plutôt largement au réchauffement de la planète", affirme Emanuel. "Je faisais pourtant moi-même partie des sceptiques il y a un an", ajoute-t-il.*

*Un mois plus tard, Peter Webster et Greg Holland, du NOAA, ont également publié des études confortant les conclusions de Kevin Trenberth. "Nous nous étions lancés là-dedans parce que nous ne pensions pas que ce qui s'est passé avec les ouragans*

de l'Atlantique était dû, comme il l'affirmait, au réchauffement climatique, raconte Webster. Et nous avons fini par penser que ses conclusions étaient en partie vraies." S'il n'y a pas eu d'augmentation générale du nombre des ouragans, Webster et Holland concluent que celui des tempêtes les plus fortes a quasiment doublé depuis le début des années 1970. La tendance est, selon eux, mondiale et clairement liée à l'élévation de la température à la surface des mers du globe.

La polémique s'est donc amplifiée. Dans une réponse détaillée postée sur son site à la mi-octobre 2005 ([tropical.atmos.colostate.edu](http://tropical.atmos.colostate.edu)), Gray affirme que les calculs d'Emanuel "ne sont pas réalistes" et que les découvertes de Webster ne "sont pas plausibles physiquement". Mais Webster relève que Gray n'a contribué qu'à un seul article sur le réchauffement de la planète et les ouragans. "Nous répondons à quelqu'un qui n'a pas fait de recherches sur ce sujet." Quel est donc l'objet de la controverse ? Pour dire les choses simplement, Gray pense que ces deux articles reposent sur des données erronées. Selon lui, les mesures recueillies entre 1973 et 1986 dans le Pacifique Ouest, la plus grande zone d'activité cyclonique, en particulier par des avions qui pénétraient dans l'œil du cyclone, ne sont pas fiables. A l'époque, on avait adopté une nouvelle méthode pour estimer la vitesse des vents à partir des mesures brutes, dont tous les chercheurs reconnaissent aujourd'hui qu'elle produisait systématiquement des résultats inférieurs à la réalité. Les calculs d'Emanuel sont donc biaisés. "Si on laisse de côté cette période atypique, on ne constate pas grand changement", explique Gray. Si l'on exclut les données défectueuses, conclut-il, on ne relève aucune tendance digne de ce nom hormis dans l'Atlantique Nord, où la récente recrudescence des ouragans s'explique par un cycle naturel bien connu.

Ni Emanuel ni Webster ne contestent l'existence de problèmes de pertinence des données, mais ils affirment tous les deux avoir fait les corrections nécessaires. Webster ajoute que tous ses chiffres datent d'après 1970, une période où les mesures par satellite complètent celles effectuées par avion, et accuse Gray de "se raccrocher à du vide". Cette controverse s'explique peut-être en partie par les différences de perspectives des protagonistes. Les prévisions de Gray reposent largement sur des homologues avec le passé. Les climatologues cherchent, eux, à mettre en lumière des tendances à long terme. Ils étudient les différences, non les similitudes. De même, Gray s'intéresse essentiellement aux ouragans qui se produisent dans l'Atlantique, soit 10 % du total, alors que tout le monde admet que la fréquence et l'intensité des tempêtes y sont largement commandées par un cycle naturel. Webster et Emanuel s'intéressent aux autres ouragans qui se produisent dans le monde et qui représentent 90 % des cyclones. Qu'en est-il aujourd'hui ? Les derniers ouragans n'ont pour le moment rien d'extraordinaire. Celui qui a frappé Galveston, au Texas, en 1900 a tué plus de personnes que Katrina en 2005. Et tous deux font pâle figure à côté de celui qui a touché le Pakistan oriental en 1970 et qui a probablement fait 500 000 victimes. Tip, l'ouragan le plus puissant jamais enregistré, s'est produit en 1979 avec une pression de 870 millibars en son centre, des vents de 300 kilomètres-heure et un diamètre de 2 174 kilomètres. Heureusement, il s'était considérablement affaibli avant de balayer le Japon. Il est donc parfaitement inutile de disputer le rôle éventuel du réchauffement climatique sur les divers cyclones qui se sont produits récemment. En fait, Emanuel estime que le nombre d'ouragans frappant les Etats-Unis est tellement faible qu'il faudra cinquante ans pour pouvoir y détecter une tendance nette. Pour l'ensemble de l'Atlantique Nord, en revanche, la recrudescence des ouragans enregistrée au cours des dix dernières années est, selon lui, "sans précédent et reflète probablement les effets du réchauffement de la planète".

Certains signes indiquent donc que l'homme y a une part de responsabilité. Et, si rien n'est encore prouvé, on ne peut pas pour autant faire comme si de rien n'était. La découverte la plus frappante d'Emanuel et de Webster est l'existence d'un lien étroit entre la température à la surface de la mer et la force d'un cyclone. Pour le moment, du moins, l'idée que des mers plus chaudes provoquent des ouragans plus forts semble fondée. Ce qui inquiète un nombre croissant de chercheurs, c'est la possibilité que cette tendance se poursuive, que les cyclones gagnent substantiellement en puissance avec l'accroissement de la quantité d'énergie dégagée par un monde plus chaud. Même une faible augmentation de la vitesse du vent, des précipitations ou de la puissance des ouragans peut avoir des conséquences terribles sur les hommes. On pourrait réduire considérablement ces effets en mettant notamment un terme à l'urbanisation dans les zones les plus vulnérables et en construisant des bâtiments plus résistants au vent et aux inondations. La question que devraient se poser les autorités n'est donc peut-être pas de savoir si Emanuel et Webster ont raison, mais si on peut se permettre de supposer qu'ils ont tort.

### **Fred Pearce**

"A hundred years ago, Upton Sinclair wrote, "It is difficult to get a man to understand something when his salary depends upon him not understanding." Here's what I think we here understand about Hurricane Katrina and global warming. Yes, it is true that no single hurricane can be blamed on global warming. Hurricanes have come for a long time, and will continue to come in the future. Yes, it is true that the science does not definitively tell us that global warming increases the frequency of hurricanes - because yes, it is true there is a multi-decadal cycle, twenty to forty years that profoundly affects the number of hurricanes that come in any single hurricane season. But it is also true that the science is extremely clear now, that warmer oceans make the average hurricane stronger, not only makes the winds stronger, but dramatically increases the moisture from the oceans evaporating into the storm - thus magnifying its destructive power - makes the duration, as well as the intensity of the hurricane, stronger."

**Al Gore: Hurricane Katrina and Global Warming. Concerning Hurricane Katrina and global warming. Given to the National Sierra Club Convention, San Francisco on 9 September 2005.**



### Commentaire

Dans la communauté scientifique, l'évolution, dans le cadre du changement climatique, de l'activité cyclonique ne fait pas consensus, mais tous s'accordent à souligner les nombreuses incertitudes existant encore au sein des modèles prédictifs. Tous insistent sur le fait qu'un événement météorologique ponctuel aussi exceptionnel qu'il soit ne peut être relié avec certitude au réchauffement climatique. Ces précisions apportées par les scientifiques conduisent à nuancer les propos sur la relation entre Katrina et le changement climatique et à chercher d'autres éléments contributifs à la catastrophe de la Nouvelle Orléans comme la vulnérabilité de la ville.

---

#### 2.3 Partie 2 : Analyse critique : Relier une année cyclonique exceptionnelle et le changement climatique

L'expérimentation de modélisation simple conduit à mettre en exergue l'importance de la température de l'eau sur la formation et la puissance des cyclones. Elle peut conduire à considérer que le changement climatique se traduisant par une élévation de la température des océans, une intensification de l'activité cyclonique est probable.

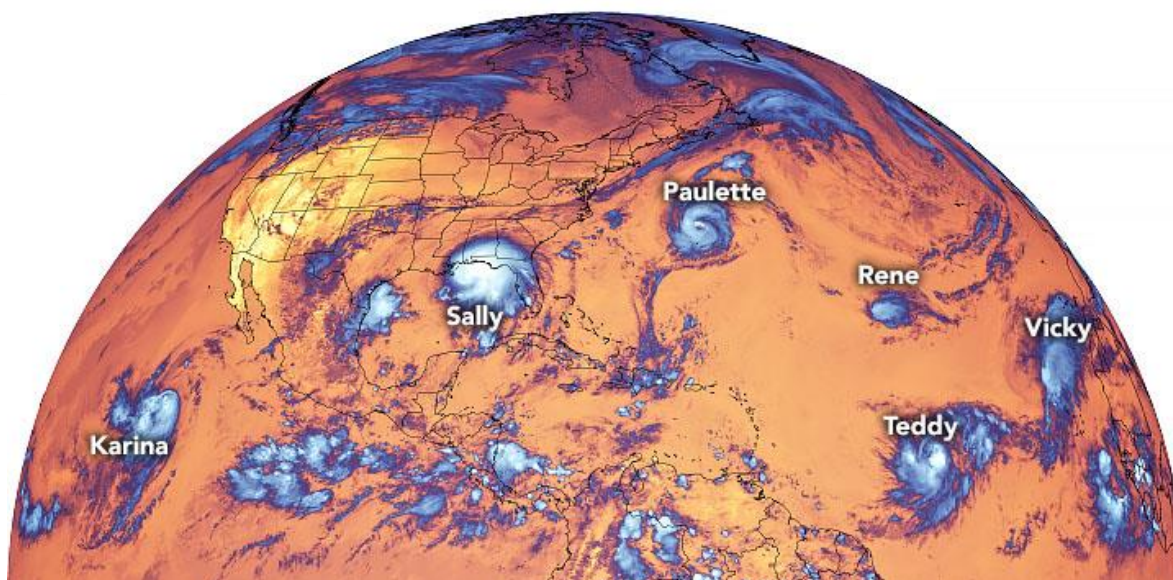
Un raisonnement similaire est régulièrement proposé lors d'événements ou de saisons cycloniques exceptionnelles. Pourtant la communauté scientifique, se refuse à le suivre et dans chaque rapport sur le climat du GIEC, insiste sur la grande incertitude des modèles sur ce sujet.

On se propose ici d'expliquer à partir d'une étude documentaire pourquoi il existe encore autant d'incertitude sur l'évolution future de l'activité cyclonique

### Introduction

La saison cyclonique 2020 débuta précocement le 16 mai avec la tempête tropicale Arthur. Pour la sixième fois consécutive on observait l'apparition d'un phénomène cyclonique avant le début officiel du 1er juin. Après une série de tempêtes tropicales, en général de courte durée, le premier ouragan fut Hanna qui atteignit la catégorie 1 de l'échelle de Saffir-Simpson le 25 juillet avant de frapper le sud-est du Texas et le nord du Mexique. Le premier ouragan majeur fut Laura qui passa sur les Grandes Antilles comme tempête tropicale mais atteignit la catégorie 4 sur le golfe du Mexique avant de frapper la côte de la Louisiane le 27 août, faisant au moins 72 morts dont 31 en Haïti. À partir d'août le rythme s'accéléra et septembre connut une explosion de formation de systèmes tropicaux (10). Jusqu'à 5 cyclones furent actifs en même temps (Paulette, Rene, Sally, Teddy et Vicky), du jamais vu dans les annales. Le 18 septembre, la liste des noms prévus pour 2020 fut même épuisée et pour la seconde fois de l'histoire, après la saison 2005, on a dû utiliser l'alphabet grec pour nommer, à quelques heures d'intervalle, les tempêtes Alpha et Beta. Octobre vit 4 systèmes espacés dans le temps mais qui devinrent des ouragans, dont 2 majeurs (Delta et Epsilon), et la péninsule du Yucatán ainsi que la Louisiane furent frappées à répétition. Novembre vit d'abord l'ouragan Eta qui frappa l'Amérique centrale à la catégorie 4 et fit plus de 300 morts et disparus avant de se tourner vers Cuba ainsi que la Floride. Le 10 novembre, la saison 2020 brisa officiellement le record du plus grand nombre de tempêtes nommées de la saison cyclonique 2005 avec la tempête tropicale Thêta, la 29e de la saison. Le 13 novembre, Iota devint le 31e cyclone. Sa dissipation le 18 a marqué la fin d'une saison exceptionnelle.

**Peut-on imputer au changement climatique l'enchaînement exceptionnel de septembre ? A l'aide de l'étude des documents, discuter de la réalité de l'assertion suivante « l'année cyclonique 2020 a été exceptionnelle dans l'Océan Atlantique, elle résulte du réchauffement climatique provoqué par les activités humaines et constitue le modèle de ce qui nous attend pour les années à venir »**



### Document 1 : Définition et formation des cyclones

Document 1 A : Qu'est-ce qu'un cyclone ?

**Source : Comprendre : Tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France.**

<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-cyclones#>

Chaque année, les régions tropicales sont le siège de violentes perturbations atmosphériques communément appelées "cyclones". Ces phénomènes tourbillonnaires, de pression centrale très basse, tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud et dans le sens contraire dans l'hémisphère nord. Ils s'étendent sur 500 à 1 000 km et leur centre, appelé œil du cyclone. La zone autour de l'œil est constituée de cumulonimbus dont le sommet atteint 12 à 15 km d'altitude. Ce "mur" de nuages produit les effets les plus dévastateurs : les pluies y sont diluviennes et les vents y soufflent jusqu'à 300 km/h au-delà de 117 km/h, on parle de cyclone. L'échelle de Saffir-Simpson classe les cyclones, selon la force des vents maximums et l'ampleur des dégâts potentiels.

Échelle de Saffir-Simpson	
Classe	Vents maximum
1	118 et 153 km/h
2	154 et 177 km/h
3	178 et 209 km/h
4	210 et 249 km/h
5	Supérieurs à 249 km/h (catégorie des super-cyclones)

Document 1 B : Conditions de formation

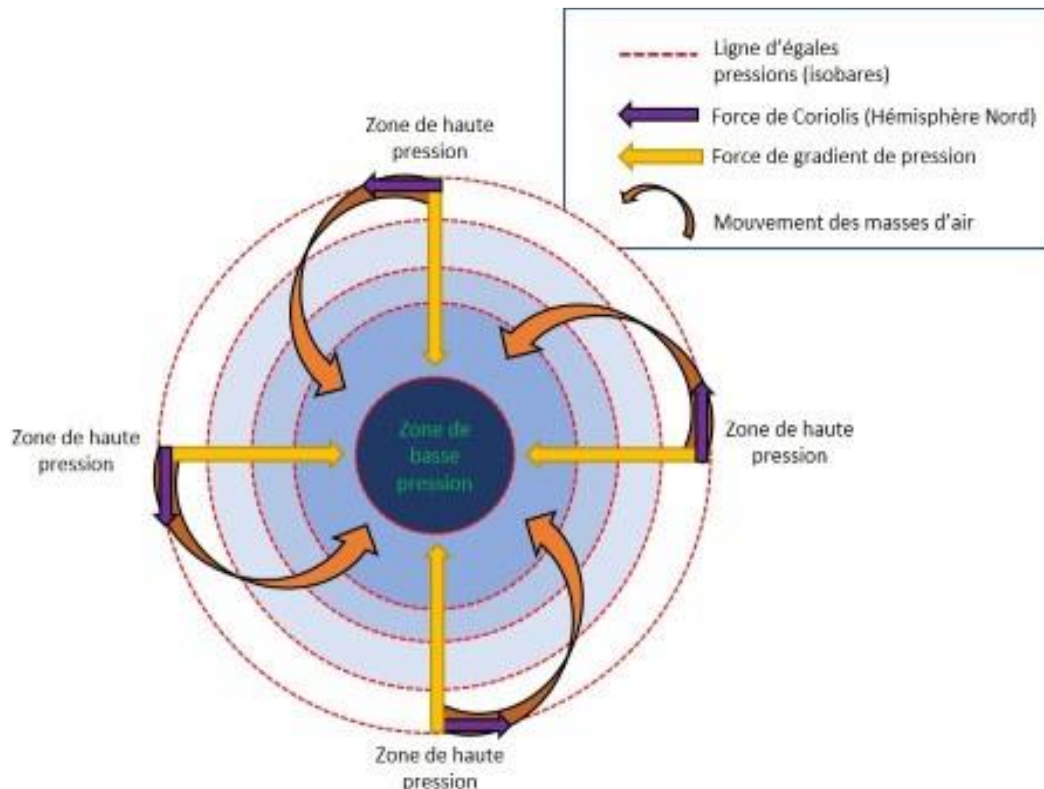
**Source : La vie d'un cyclone.** <http://www.futura-sciences.com>. <http://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-cyclone-ouragan-typhon-sont-ils>

Un cyclone naît et se développe uniquement si les conditions suivantes sont réunies :

- Une condition thermique : une température de la mer supérieure à 26 °C sur une épaisseur minimale de 50 m. L'évaporation de surface de grandes quantités d'eau fournit l'énergie nécessaire pour entretenir le système de machine à vapeur qu'est une formation cyclonique.
- Une condition géographique : être suffisamment éloigné de l'Équateur de façon à ce que la force de Coriolis ne soit pas nulle. Cette force, engendrée par la rotation terrestre, imprime une déviation du vent : c'est elle qui intervient pour déclencher le mouvement tourbillonnaire initial.
- Une forte humidité, indispensable à la formation des cumulonimbus.

L'enroulement des vents qui engendre la formation du cyclone est tributaire de :

- La préexistence d'une zone dépressionnaire, générant les mouvements ascendants, permettant à l'air humide de s'élever ;
- La présence de vents en altitude (jusqu'à 15 km). Ces vents doivent être relativement homogènes : même direction et même force ou presque. Dans le cas contraire, l'énergie développée par le système va se disperser et le système a tendance à se « cisailer ».

Commentaire

La connaissance des processus présidant à la formation des cyclones est indispensable pour prédire l'évolution future de l'activité cyclonique. Si la condition thermique mise en évidence par l'expérimentation est réelle, d'autres facteurs semblent importants à considérer en particulier l'importance de l'humidité dans la cyclogenèse et le rôle de la structuration des vents dans la pérennité du phénomène



**Document 2 : Les cyclones de l'année 2020**Document 2A : Liste et caractéristiques des cyclones de l'année 2020

Nom	Catégorie	Mois	Vitesse maximale (Km/H)	Pression minimale (hPa)
Arthur	TS	5	95	990
Bertha	TS	5	85	1005
Cristobal	TS	6	95	988
Dolly	TS	6	75	1000
Edouard	TS	7	75	1007
Fay	TS	7	95	998
Gonzalo	TS	7	100	997
Hanna	H1	7	150	973
Isaías	H1	7	140	987
Ten	Tropical depression	7	55	1008
Josephine	TS	8	75	1004
Kyle	TS	8	85	1000
Laura	H4	8	240	937
Marco	H1	8	120	991
Omar	TS	8	65	1003
Nana	H1	9	120	994
Paulette	H2	9	165	965
Rene	TS	9	75	1001
Sally	H2	9	165	965
Teddy	H4	9	220	945
Vicky	TS	9	85	1000
Beta	TS	9	95	994
Alpha	SubTS	9	85	996
Wilfred	TS	9	65	1006
Gamma	TS	10	110	980
Delta	H4	10	230	953
Epsilon	H3	10	185	951
Zeta	H2	10	175	970
Eta	H4	10	240	923
Theta	TS	11	110	989
Iota	H5	11	260	917

Document 2B : Une année de tous les records !

**Source: NASA earth observatory** <https://earthobservatory.nasa.gov/images/147643/a-destructive-abundance>

La saison des ouragans de l'Atlantique 2020 restera dans l'histoire comme une saison de superlatifs :

- Le plus grand nombre de tempêtes nommées observées en un an (30)
- Le plus grand nombre de tempêtes à toucher les États-Unis (12)
- Le plus grand nombre de tempêtes à frapper la Louisiane (5)
- Le plus grand nombre de tempêtes à se former en septembre (10).

La saison 2020 a été exceptionnelle, et pas seulement dans les chiffres bruts. « Ce qui m'a vraiment époustoufflé, ce sont les événements d'intensification explosive », a déclaré Jim Kossin, scientifique à la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). « Par exemple, la vitesse du vent de l'ouragan Eta a augmenté d'environ 130 kilomètres à l'heure en une seule journée.

Au cours des dernières décennies, les ouragans se sont rapidement intensifiés plus souvent, et leur mouvement vers l'avant s'est ralenti davantage. 2020 a poursuivi les deux tendances. Neuf tempêtes se sont rapidement intensifiées,

ce qui est observé lorsque des vents augmentent d'au moins 56 kilomètres à l'heure en 24 heures. Trois d'entre eux – Eta, Iota et Delta – ont vu leurs vents s'intensifier d'au moins 130 kilomètres à l'heure en 24 heures. Deux cyclones se sont distingués par un déplacement très lent, ainsi Sally s'est déplacée à seulement 4 kilomètres à l'heure pendant une période, soit plus lentement qu'un rythme de marche.

Au cours de la saison 2020, presque l'ensemble de la côte atlantique des États-Unis, du Texas au Maine, ont été soumis à une surveillance ou à un avertissement de tempête tropicale à un moment donné. Il s'agit également de la cinquième année consécutive avec une activité ouragan supérieure à la moyenne.

Cette année, les États-Unis ont été frappés beaucoup et les tempêtes ont fait beaucoup de dégâts, mais les dommages auraient certainement pu être pires si les trajectoires des tempêtes avaient été légèrement différentes », a déclaré Phil Klotzbach, un météorologue à l'Université d'État du Colorado. « Pour l'ouragan Laura, l'onde de tempête aurait pu dévaster le lac Charles si la tempête avait dévié trente-cinq kilomètres plus à l'ouest. » L'ouragan Laura de catégorie 4 a été le plus fort à toucher terre les États-Unis cette saison, apportant des vents soutenus de 240 kilomètres à l'heure et des ondes de tempête allant de 3 à 5 mètres. En Amérique centrale, les ouragans de catégorie 4 Eta et Iota ont touché terre à moins de deux semaines l'un de l'autre dans la même partie du Nicaragua. Jamais deux ouragans de l'Atlantique n'ont frappé la même région avec une telle force si près dans le temps. « Eta s'est distingué comme l'une des tempêtes les plus catastrophiques de la saison, car il a stagné et s'est rapidement intensifié en même temps », a déclaré Tim Hall, un chercheur sur les ouragans à la NASA Goddard Institute for Space Studies. « Cela s'est également produit en novembre, bien après que la saison ait généralement atteint des sommets. »



Les images montrent le nord-est du Nicaragua le 20 octobre (à droite) et le 8 novembre 2020 (à gauche). Ces images en fausses couleurs, acquises avec le spectroradiomètre d'imagerie à résolution modérée (MODIS) du satellite Terra de la NASA, utilisent une combinaison de lumière infrarouge et visible (bandes 7-2-1) pour faciliter la distinction entre l'eau et la terre, en particulier dans les zones inondées. L'eau apparaît bleu marine et noir ; les nuages sont blancs ou cyan ; et la végétation est vert vif

### Commentaire

2020 constitue à l'image de 2005 une année cyclonique exceptionnelle pour l'Atlantique, il est à noter cependant que la médiatisation de cette année cyclonique a été notablement plus modeste (que ce soit aux USA ou en Europe) sans doute en lien avec les plus faibles conséquences de ces phénomènes

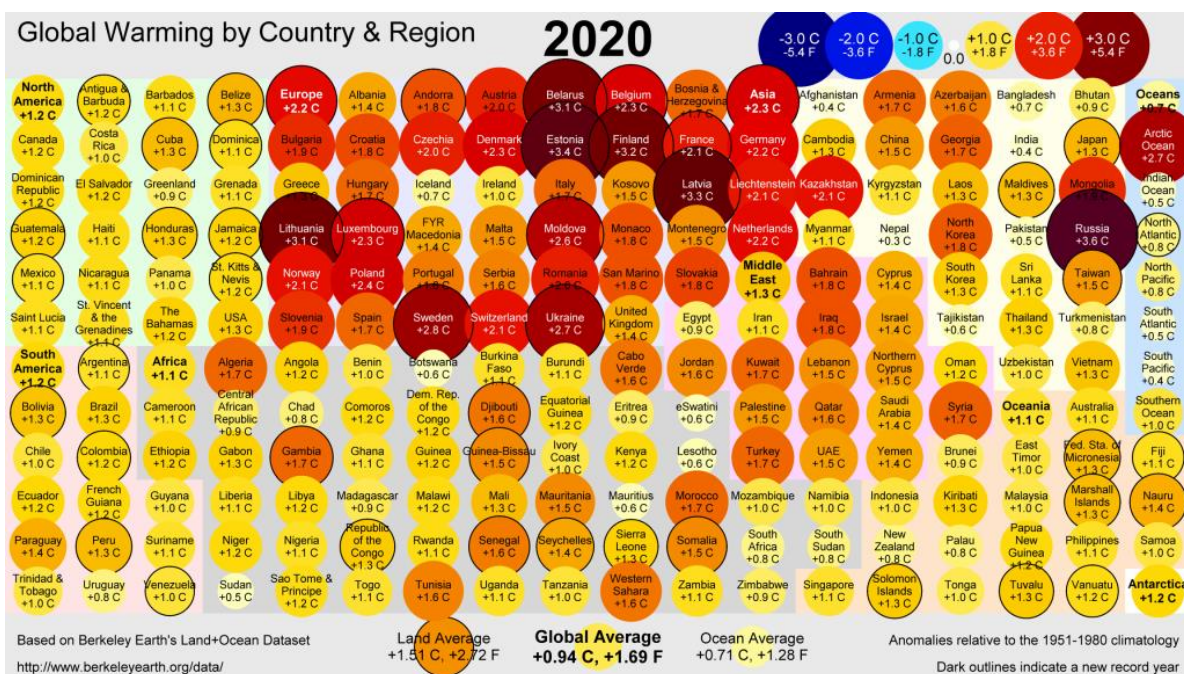
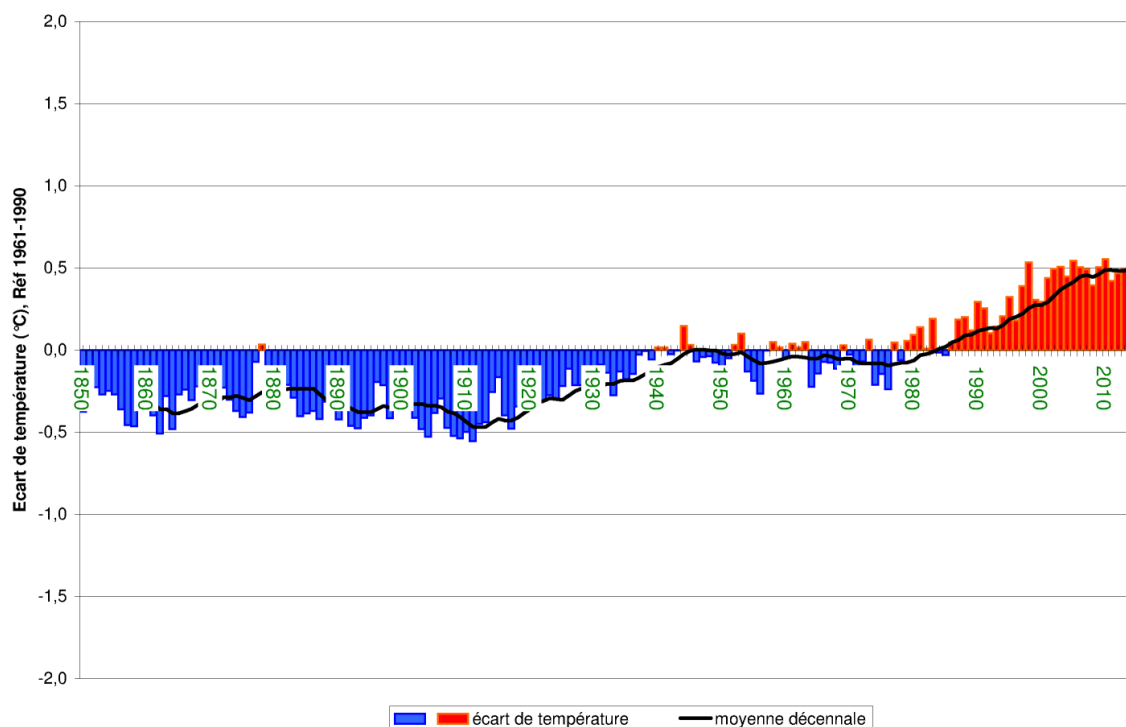
### Document 3 : Réchauffement climatique et réchauffement des océans

Document 3A : Evolution des températures depuis 1850

**Source : Comprendre : Tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France.** <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france>

Depuis 1850, on constate une tendance claire au réchauffement climatique, et même une accélération de celui-ci. Au XXe siècle, la température moyenne du globe a augmenté d'environ 0,6 °C et celle de la France métropolitaine de plus de 1 °C. La décennie 2002-2011 est la période de 10 années consécutives la plus chaude au moins depuis le début des mesures instrumentales, en 1850. En raison d'une forte variabilité naturelle, la température moyenne du globe peut, certaines années, être plus élevée ou plus basse que celle des années précédentes. Mais cette variabilité interannuelle ne doit pas être confondue avec l'évolution de fond : une tendance générale à la hausse marquée

depuis plus d'un siècle. Près de la surface terrestre, le réchauffement s'est accentué. Depuis le milieu des années 1970, il a atteint une moyenne de 0,17 °C par décennie.



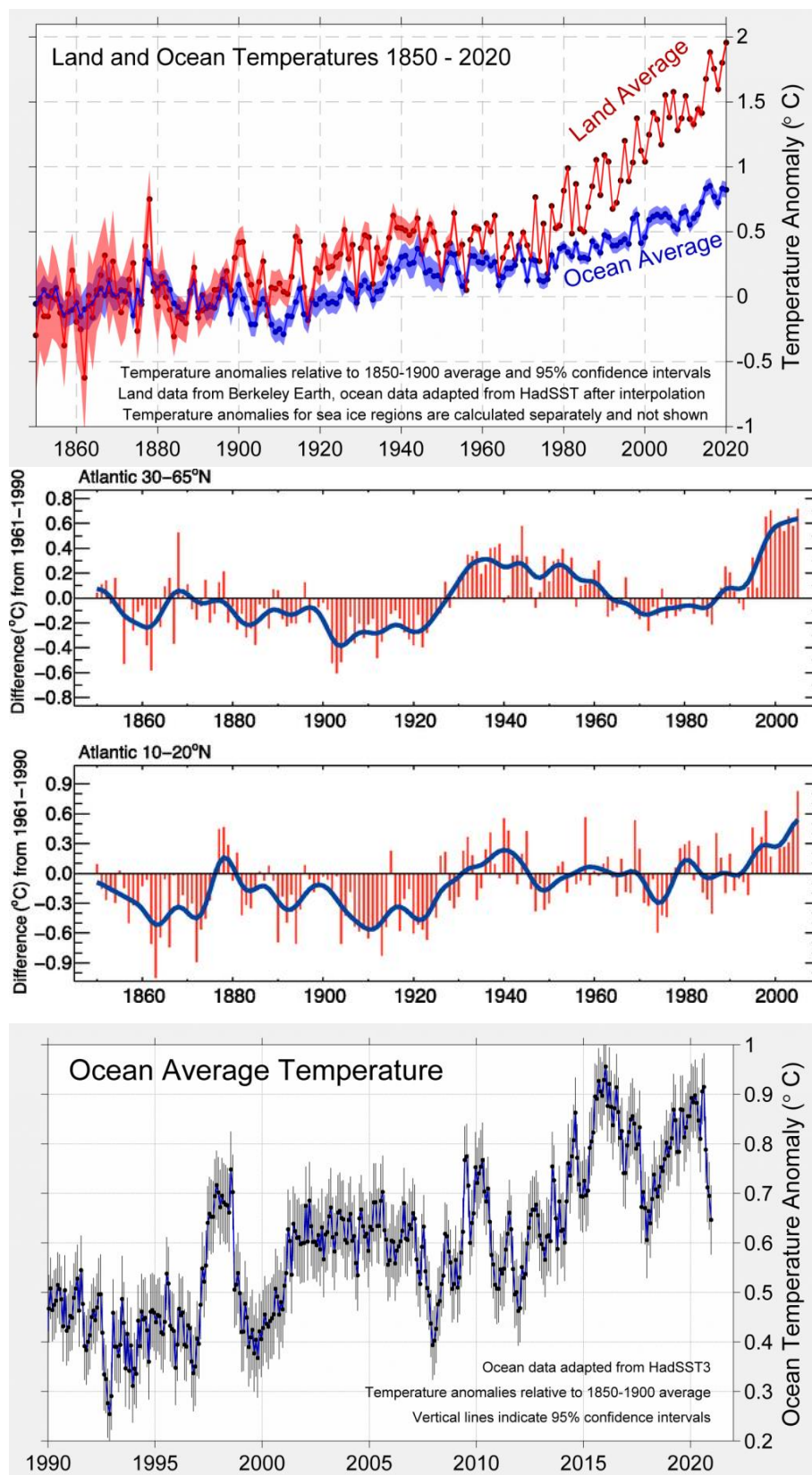
A gauche : Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par rapport à la normale de référence : température moyenne du globe (données du Climatic Research Unit, University of East Anglia. Le zéro correspond à la moyenne de l'indicateur sur la période 1961-1990, soit 14,0 °C).

A droite : Valeur du réchauffement climatique par pays.



## Document 3B : Evolution des températures océans mondiaux

Source: Global Temperature Report for 2020. Université de Berkley. <http://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2020/>





## Commentaire

Les différents documents illustrent le réchauffement global de notre planète. Celui-ci se produit aussi bien au niveau des continents que des océans, mais la vitesse de réchauffement de ces derniers est moindre. Il est à observer que l'étude de l'évolution des températures de l'Océan Atlantique révèle une oscillation assez nette de ces températures depuis 1860 et non pas une croissance constante.

### Document 4 : Phénomènes climatiques et évolution de la température des océans

Document 4A : Oscillations de température dans l'Océan Atlantique

Source : <http://www.meteofrance.fr/documents/10192/44373/2010-03-11.pdf/>

En étudiant l'évolution globale de la pression atmosphérique et de la température des océans au cours du 20ème siècle, des signaux climatiques naturels ont été mis en évidence. On peut ainsi remarquer que dans l'océan Atlantique Nord les anomalies de température de surface de la mer ou SST (ligne bleue) ont changé trois fois de signe au cours du siècle dernier : la période de 1900 à 1928 (signe négatif) correspond à une phase de refroidissement, celle de 1928 à 1965 (signe positif) à une phase de réchauffement, et celle de 1968 à 1995 (signe négatif) à une nouvelle phase de refroidissement. Au 21ème siècle, une phase de réchauffement est observé. Cette oscillation Atlantique multi-décennale, est appelée AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation),

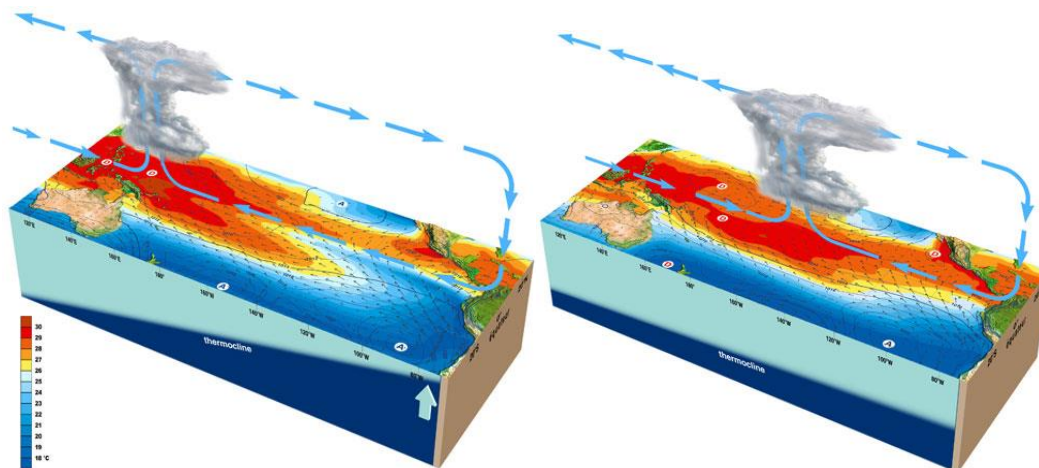
Document 4B : El niño

Source : Comprendre : Tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/comprendre-le-climat-mondial/el-ninola-nina>

El Niño, et son pendant La Niña sont des phénomènes océaniques à grande échelle du Pacifique équatorial, affectant le régime des vents, la température de la mer et les précipitations.

Hors événement El Niño, les alizés de sud-est sont bien établis sur la face nord de l'anticyclone de l'île de Pâques. Ces vents réguliers, qui soufflent d'est en ouest, entraînent les eaux chaudes de surface vers l'ouest. Le déplacement des eaux chaudes provoque une remontée des eaux profondes, froides, à l'est du Pacifique, le long des côtes du Pérou. Sur la carte des températures de la mer apparaît, le long de l'équateur, une langue froide caractéristique. Aux eaux chaudes est liée une ascendance de l'air entraînant la formation de nuages et de précipitations ; aux eaux froides, une descente de l'air entraînant son assèchement. Certaines années, ces caractéristiques sont particulièrement marquées. On parle d'un événement La Niña.

Lors d'un épisode El Niño, les hautes pressions du Pacifique Sud diminuent. Les alizés faiblissent, voire se renversent. Les eaux chaudes de surface, accompagnées de nuages et de précipitations, refluent de l'ouest vers l'est. De par son ampleur El Niño affecte le climat mondial dans son ensemble. Par ailleurs, à l'échelle du globe, la température moyenne a tendance à être anormalement élevée pendant les années concernées par ces épisodes



### Commentaire

Une série de documents qui permet d'évoquer la notion de variabilité interne du climat. Les caractéristiques du climat présentent des fluctuations naturelles induites par des modifications des circulations atmosphériques et surtout océaniques ; Ces mécanismes dont les déclencheurs ne sont pas toujours bien identifiés se produisent avec différentes périodicités mais peuvent affecter différents paramètres climatiques. L'Oscillation Multidécennale Atlantique affecte significativement la température de l'Océan Atlantique et semble même au regard des courbes prépondérante. Cela signifie qu'en conservant la même logique de raisonnement sur le lien entre température et l'activité cyclonique au sein du bassin Atlantique, on peut être amené à discuter sur la période récente sur la contribution relative de l'augmentation de la température liée à une phase AMO + et le réchauffement climatique.

### **Document 5 : Statistiques sur les cyclones dans l'Atlantique**

**Source :** [http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/Data\\_Storm.html](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/Data_Storm.html)

Sur la page suivante :

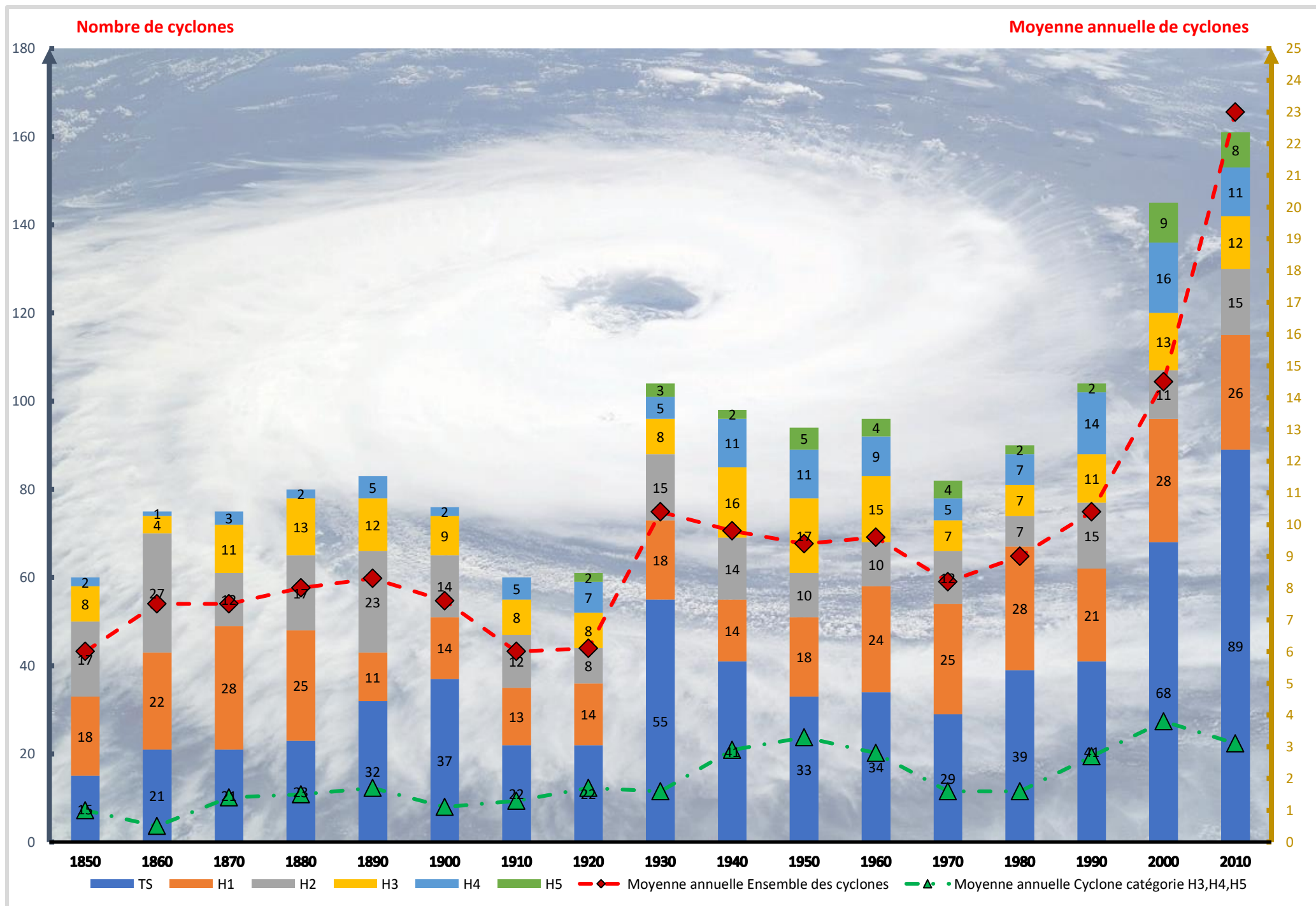
- Nombre de cyclones par catégorie par décennie (1850 signifie durant la décennie 1851-1860)
- Moyenne annuelle de cyclones pour une décennie

### **Informations complémentaires**

- . Ces graphiques ont été élaborés à partir d'une base de données élaborée par les services météorologiques américains, le N.H.C. de Miami depuis 1886. Cette base de données de plus de 130 ans, a fait l'objet d'un traitement spécifique, à la fois numérique et graphique. Bien entendu, avant l'avènement des satellites météorologiques au cours des années 60, on peut s'interroger sur la qualité et la véracité des informations contenues dans cette base. Par contre, nul doute qu'à partir de la fin des années 60, les indications de cette base de données sont fiables.

### Commentaire

L'approche statistique montre une corrélation réelle mais pas parfaite entre le nombre de cyclone et la température et l'indice associé à l'Oscillation Multidécennale Atlantique. Cette corrélation n'exclut cependant une tendance haussière associée au changement climatique.



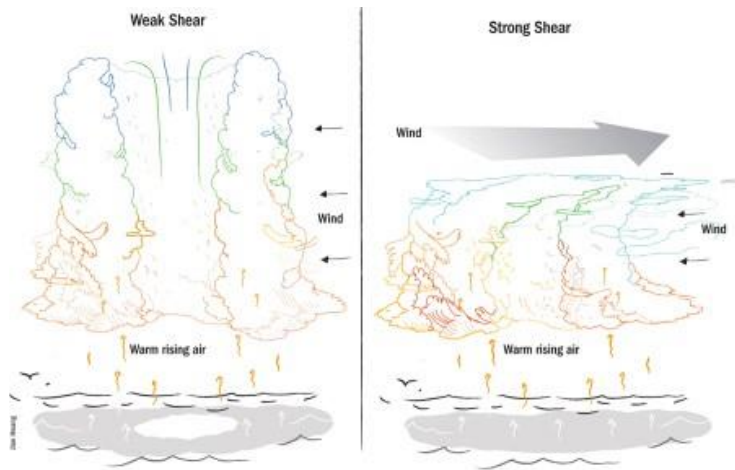
## **Document 6 : Cisaillement des vents et cyclones**

### Document 6A : Le cisaillement des vents

**Source : Comprendre : Tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France.**

<http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/149916-cisaillement> et [NOAA Climate.gov](http://www.noaa.gov).

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/impacts-el-ni%C3%B1o-and-la-ni%C3%B1a-hurricane-season>



Les variations de la direction et de la vitesse du vent ne sont pas systématiquement lentes et continues à l'échelle verticale : il peut en effet se produire des changements notables et dans la répartition spatiale des déplacements de l'air, qui parfois prennent même la forme d'une discontinuité ; ces changements affectent et/ou la valeur de la direction du vent tantôt et sa vitesse. De telles variations verticales du vent sont appelées des cisaillements. Les cyclones tropicaux nécessitent des cisaillements de vent verticaux faibles de façon que le cœur chaud puisse rester au-dessus du centre de la circulation altitude et permette un renforcement du cyclone. Durant un épisode El Niño on observe

une évolution du cisaillement vertical des vents dans ces régions, avec une nette diminution de celui dans le Pacifique et une augmentation significative de celui-ci dans le bassin Atlantique. Durant un épisode La Niña, le phénomène est inversé

### Document 6B : Activités cycloniques et épisodes El Niño et la Niña

Statistiques cycloniques sur la période 1982-2020. Les années avec une flèche en rouge correspondent à des années à fort épisodes El Niño durant la période cyclonique (Avril-décembre), celle en bleu à des années à fort épisode La Niña.

**Source :** <http://ggweather.com/enso/oni.htm> ; [http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/Data\\_Storm.htm](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/Data_Storm.htm)

#### Commentaire

Le cisaillement des vents est un facteur décisif dans la pérennité d'un cyclone, elle correspond à l'une des conditions d'enroulement évoquée dans le document 1 :

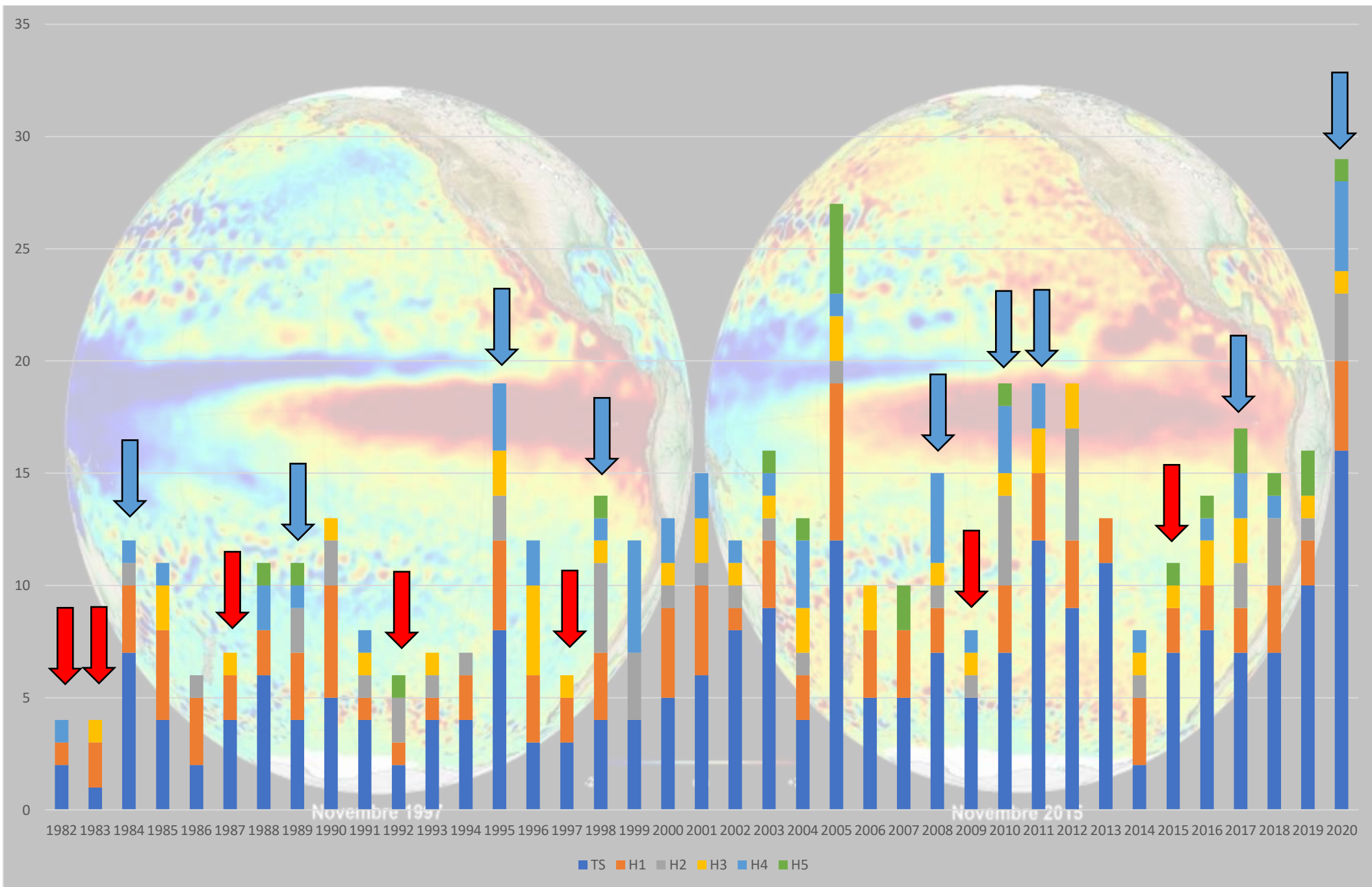
« La présence de vents en altitude (jusqu'à 15 km). Ces vents doivent être relativement homogènes : même direction et même force ou presque. Dans le cas contraire, l'énergie développée par le système va se disperser et le système a tendance à se « cisailer ». »

Cette condition est l'objet de fluctuations provoqué par les variations internes du climat comme l'oscillation El Niño/La Niña évoquée dans le document 4

L'étude statistique du nombre de cyclone rapporté aux événements la Niña montre une assez bonne corrélation qui peut s'expliquer par la relation entre ces événements et le cisaillement des vents

En associant les deux éléments de variabilités internes que constitue l'AMO qui joue la température de surface et la Niña qui joue sur le cisaillement des vents on dispose mécanismes déterminant pour l'activité cyclonique





## **Document 7 : Evolutions futures de l'activité cyclonique**

**Source : « Dans l'Atlantique Nord, une saison cyclonique de tous les records » LE MONDE | 27.09.2017. Martine Valo. [http://www.lemonde.fr/climat/article/2017/09/27/dans-l-atlantique-nord-une-saison-cyclonique-de-tous-les-records\\_5192413\\_1652612.html](http://www.lemonde.fr/climat/article/2017/09/27/dans-l-atlantique-nord-une-saison-cyclonique-de-tous-les-records_5192413_1652612.html)**

[...] Peut-on imputer au changement climatique l'enchaînement exceptionnel de septembre ? Fabrice Chauvin, chercheur CNRS au Centre national de recherches météorologiques, se garde de franchir le pas. « Nos courbes indiquent une forte augmentation du nombre d'épisodes cycloniques depuis 1850, mais nous ne disposons de données robustes recueillies par satellite que depuis 1966, auparavant tous n'étaient pas répertoriés », tempère-t-il.

Ces relevés, pourtant, indiquent bel et bien une augmentation nette dans les années 1990. Comment l'expliquer ? « Nous corrélons ce phénomène à l'oscillation atlantique multidécennale liée à la circulation des courants au sein de l'océan, explique Fabrice Chauvin. Celle-ci produit une alternance de cycles de vingt-cinq ou trente ans d'eaux anormalement froides puis chaudes. Dans dix ou vingt ans, nous aurons un cycle supplémentaire qui devrait nous permettre de détecter des tendances. » Le changement climatique semble en revanche se traduire par un décalage des courants vers le nord. « C'est une hypothèse de recherche », note le chercheur.

Les modèles du Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) qui, eux, ne se livrent pas à des analyses météorologiques, mais simulent les évolutions possibles du climat en fonction de l'activité des volcans, des aérosols, de la concentration de CO<sub>2</sub>..., s'avancent un peu plus. Ils envisagent la réduction du nombre de cyclones d'ici la fin du siècle, mais avec davantage d'épisodes de catégories 4 et 5 et de pluies diluviennes.

**Source : « Tempête Harvey : l'inquiétant effet du réchauffement climatique sur les cyclones. [www.leparisien.fr](http://www.leparisien.fr). <http://www.leparisien.fr/environnement/nature/tempete-harvey-l-inquietant-effet-du-rechauffement-climatique-sur-les-cyclones-29-08-2017-7220772.php>**

[...] Dès 2005, une étude publiée dans Nature révélait que le nombre de cyclones demeurait stable, mais que leur puissance augmentait en moyenne depuis une cinquantaine d'années. Entre les années 1970 et 2000, l'énergie totale dissipée par les ouragans de l'Atlantique Nord et du Pacifique Ouest aurait bondi de 70%. La cause, les climatologues pensent l'avoir trouvée : la hausse des températures des océans. Un constat renouvelé fin 2012, après le passage désastreux de la super-tempête Sandy sur la côte Est des Etats-Unis. « Pour une raison quelconque, les eaux côtières sont cette année plus chaudes que la normale. Ce qui veut dire davantage de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Si nous n'avions pas eu ces eaux chaudes près des côtes, Sandy aurait probablement généré moins de précipitations », affirmait alors à Slate le spécialiste des ouragans Kerry Emanuel, du MIT. Une interprétation partagée ce mardi par la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). « Des océans plus chauds signifient des tempêtes plus humides », a-t-elle affirmé sur Twitter. Et donc plus destructrices, comme semble l'illustrer le cas d'Harvey et ses inondations-monstres.

Le réchauffement climatique fait peser une autre menace, et non des moindres, sur les régions côtières : la hausse du niveau de la mer. Or, celle-ci apparaît comme un facteur aggravant de premier ordre en cas de cyclone ou de tempête. Pour ne rien arranger, les cyclones produisent une houle qui génère des « marées de tempête », qui vient s'ajouter à la hausse générale. « Avec un niveau de la mer en hausse de 50 centimètres à un mètre d'ici la fin du siècle, un moins bon écoulement des eaux venus du continent et une augmentation des précipitations », énumère Jean Jouzel, les Harvey, Sandy, Ike et autres Katrina ont de grandes chances de se reproduire dans les années à venir.

Des études citées par Météo France ont montré que « la latitude à laquelle les cyclones ont atteint leur intensité maximale a migré vers les pôles au cours des 35 dernières années dans les deux hémisphères ». Une migration qui pourrait être liée à l'expansion de la ceinture tropicale, ces zones situées de part et d'autre de l'Equateur où règne un climat chaud et humide.

Le décalage de l'activité cyclonique dans l'Atlantique nord pourrait, toujours selon Météo-France, rendre la mer des Caraïbes et le golfe du Mexique « plus paisibles, au détriment de la côte est des Etats-Unis », mais cette tendance doit être confirmée par de nouvelles études.

**Source : In a Warming World, Storms May Be Fewer but Stronger. [www.earthobservatory.nasa.gov](http://www.earthobservatory.nasa.gov/Features/ClimateStorms/page1.php). <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/ClimateStorms/page1.php>**

[...] Depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle les températures moyennes se sont élevées de 0,6°C, mais ce réchauffement n'est pas homogène, les températures ont augmenté deux fois plus vite dans l'Arctique qu'aux latitudes moyennes. En effet la fonte des glaces de mer au Pôle Nord entraîne une diminution de l'albédo et donc de la perte d'énergie de ces régions (la glace blanche étant remplacée par l'océan plus sombre), de plus dans les régions tropicales l'augmentation de la convection atmosphérique et des tempêtes contribue à ralentir le réchauffement en déplaçant la chaleur. Les climatologues pensent que les différences de réchauffement entre les pôles et l'équateur ont un rôle significatif sur certaines tempêtes.

De plus des travaux suggèrent que dans l'Atlantique, le cisaillement des vents pourrait augmenter de 1 à 3 km.H-1 pour chaque degré supplémentaire du réchauffement de l'océan. C'est la raison pour laquelle le nombre de cyclone pourraient rester le même voir diminuer alors que les cyclones les plus puissants deviendraient plus puissants encore. Un article publié en 2010 par un groupe d'expert sur les cyclones considèrent que l'intensité moyenne des cyclones augmenterait de 2 à 11 % d'ici 2100 mais que dans le même temps la fréquence des cyclones diminuerait entre 6 et 34 %.

Un autre facteur compliqué est de savoir si les changements de température du pôle à l'équateur qui influence la formation des tempêtes peu avoir une influence sur les vents qui dirigent ces tempêtes. Ainsi le Jet Stream, courant sinueux d'air très rapide joue un rôle clef dans l'accélération ou le ralentissement des tempêtes. De faibles Jets Stream entraînent une vitesse de déplacement plus lente de la tempête qui peut alors se vider plus longtemps de ces précipitations (pluie ou neige) particulièrement au niveau du littoral. Des travaux préliminaires suggèrent que les courants de jet Stream Ouest-Est ont ralenti et sont devenu plus sinueux depuis 1979 à cause de la fonte des glaces de mer de l'Arctique, ce qui aurait contribué à des phénomènes météorologiques extrêmes ces dernières années en générant des zones de blocage, c'est-à-dire des zones de haute pression persistantes qui s'accompagnent de phénomènes extrêmes.

### Commentaire

Le mécanisme de formation et d'intensification des océans est bien tributaire de la température de surface des océans mais celle-ci est contrôlée de multiples mécanismes

Le changement climatique se traduira par une élévation de la température de surface ce qui est bien contributif d'une augmentation de l'activité cyclonique mais la prépondérance de ce facteur n'est pas encore établie avec certitude

Par ailleurs d'autres facteurs sont décisifs pour évaluer l'évolution future des cyclones comme l'évolution des régimes des vents

De nombreux modèles intégrant ces données prédisent une faible augmentation du nombre de cyclone mais possiblement une augmentation des cyclones les plus puissants

Néanmoins les incertitudes restent très importantes et il est indispensable de parfaire les connaissances sur les processus de cyclogenèse et d'améliorer les prévisions fines sur l'évolution des variabilités internes dans le contexte du changement climatique ainsi que celle de paramètres atmosphériques comme le vent ou hydrosphériques comme la température des océans

---

## 2.4 Partie 3 : L'apport du spatial

L'état des connaissances ne permet pas d'avoir de certitudes sur l'évolution future de l'activité cyclonique et plusieurs scénarii sont envisageable. Néanmoins les enjeux sont considérables. Il n'est certes pas possible d'agir sur un cyclone, mais il est possible de dimensionner des réponses d'atténuation face à cet aléa en fonction du risque réel. Ce dimensionnement passe par des modèles prédictifs fiables, et il donc souhaitable de parvenir à améliorer les modèles prédictifs. L'espace peut y contribuer largement par les possibilités offertes dans les 4 domaines suivants :

- ➔ **Observer les cyclones**
- ➔ **Mesurer la température de surface des océans**
- ➔ **Evaluer la vitesse du vent**
- ➔ **Quantifier les précipitations associées**

L'idée pédagogique est la suivante, montrer comment dans ces domaines l'Espace permet l'étude actuelle et l'évolution de ces domaines afin d'alimenter mes modèles qui permettront d'anticiper leur évolution

## 2.4.1 OBSERVER LES CYCLONES

### 2.4.1.1 INFORMATIONS GENERALES

Pour déterminer l'évolution statistique de la fréquence des cyclones, il est indispensable de recenser l'ensemble des phénomènes. Tous les cyclones ne touchent pas un continent, et certains ont parfois une durée de vie courte. La surveillance par imagerie visible satellite permet un dénombrement complet sur l'ensemble des bassins cycloniques du Monde

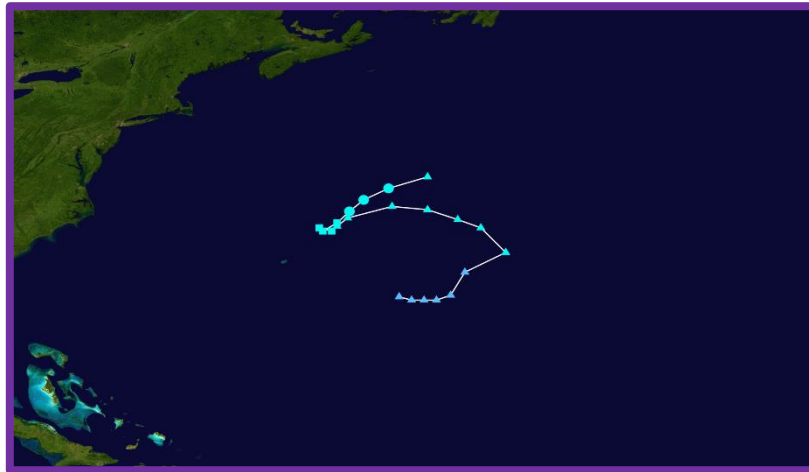


Figure 92 : la naissance et le cycle de vie du cyclone Ana (2021)

L'observation et le suivi des cyclones se fait essentiellement grâce à des satellites météorologiques géostationnaire qui permettent d'observer en continu le bassin cyclonique d'intérêt. Compte tenu de l'altitude élevée la résolution des images est basse. L'utilisation de satellite défilant permet une fois les structures repérées une observation avec une meilleure résolution qui permet d'évaluer l'évolution du phénomène en particulier son extension globale et celle de l'œil

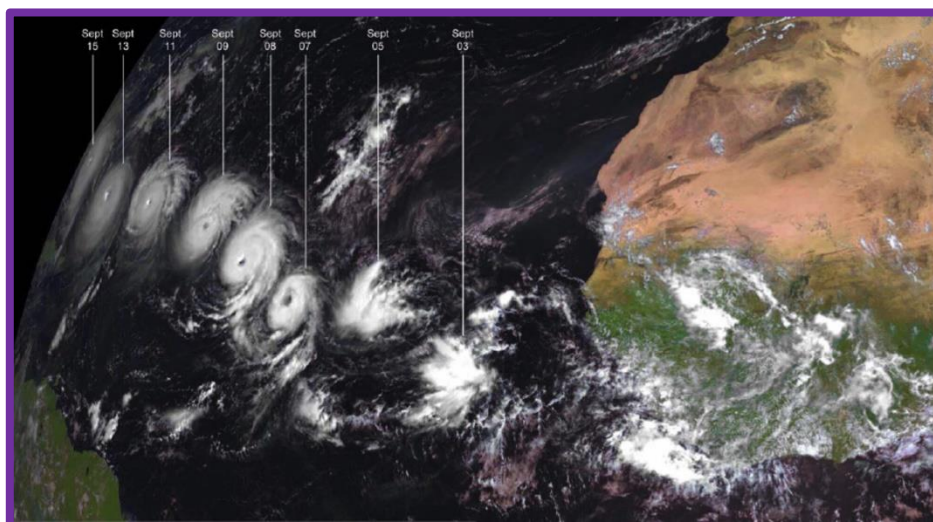


Figure 93 : Suivre un cyclone



L'imagerie dans le visible est efficace car les cyclones sont matérialisés par les nuages marquant le phénomène de rotation

L'utilisation de l'infrarouge permet de repérer les cyclones par le contraste entre l'œil du cyclone relativement chaud et le sommet des nuages environnants plutôt froid. Plus cette différence est grande, plus le cyclone est intense.

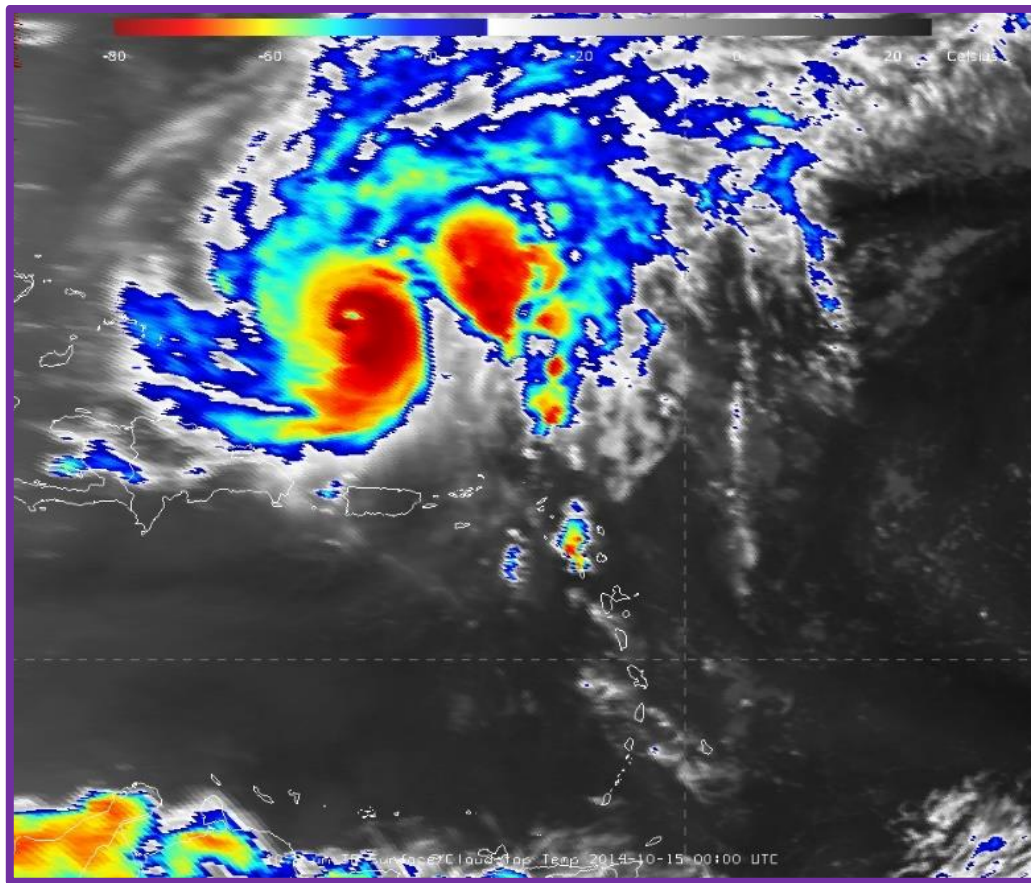


Figure 94 : Structure d'un cyclone observé en imagerie IR

Les images dites de vapeur d'eau permettent de voir les niveaux de rayonnement infrarouge, associés à l'absorption de vapeur d'eau atmosphérique. Les images de vapeur d'eau sont utiles pour cartographier les zones d'air humide et d'air sec. Les zones plus sombres indiquent un air plus sec, tandis que les zones plus claires indiquent un taux d'humidité dans l'air supérieur

L'imagerie spatiale permet de recenser avec certitude l'ensemble des phénomènes cycloniques. Leur suivi en temps réel permet d'appréhender et de recenser :

- ➔ Leur zone de formation
- ➔ Leur vitesse de déplacement et l'évolution de celle-ci
- ➔ L'extension géographique du phénomène
- ➔ La trajectoire suivie

Les données sont très disponibles, exploitables en documents ou en affichage sur un visualisateur en cas de géoréférencement, on a également la possibilité d'afficher les cyclones et de calculer :

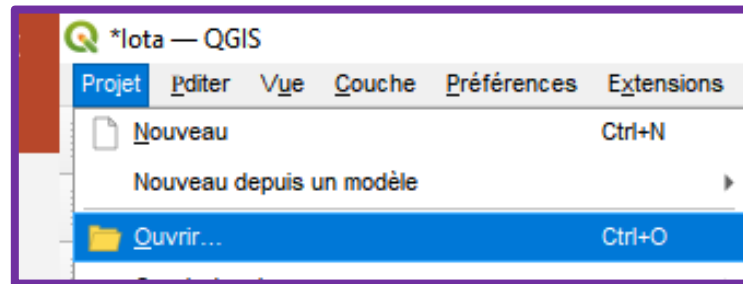
- ➔ L'extension géographique du cyclone
- ➔ La vitesse de déplacement

On peut aussi cumuler des observations sur une période définie pour effectuer des statistiques sur la fréquence des événements cycloniques, sur les zones de formation préférentielle et sur les trajectoires privilégiées

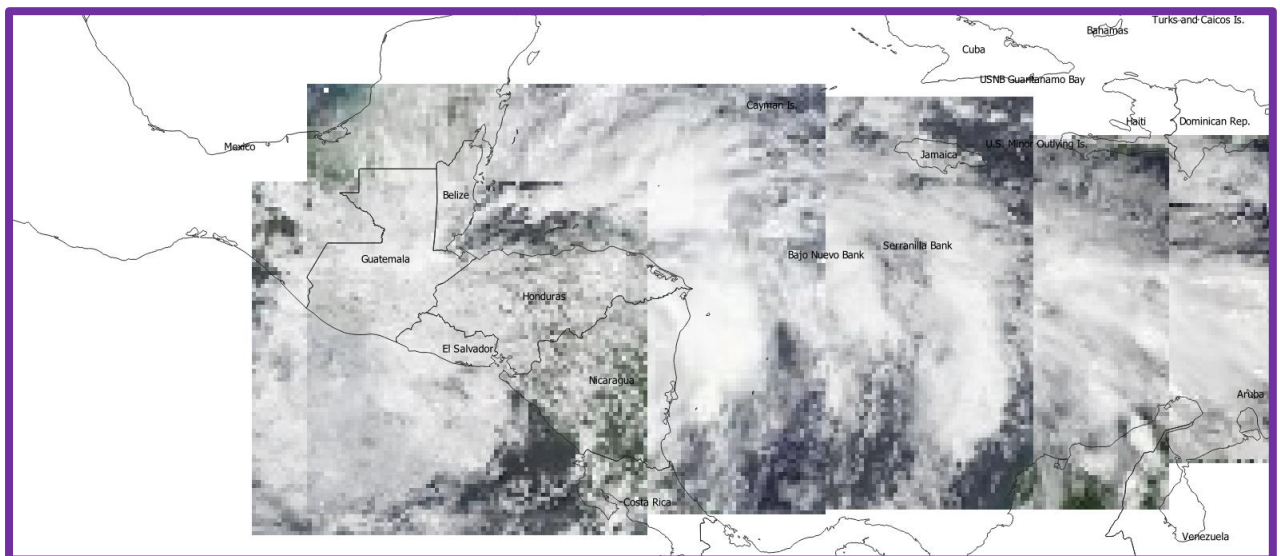
### 2.4.1.2 EXEMPLE D'UTILISATION DE DONNEES : SUIVI DU CYCLONE IOTA

#### Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone

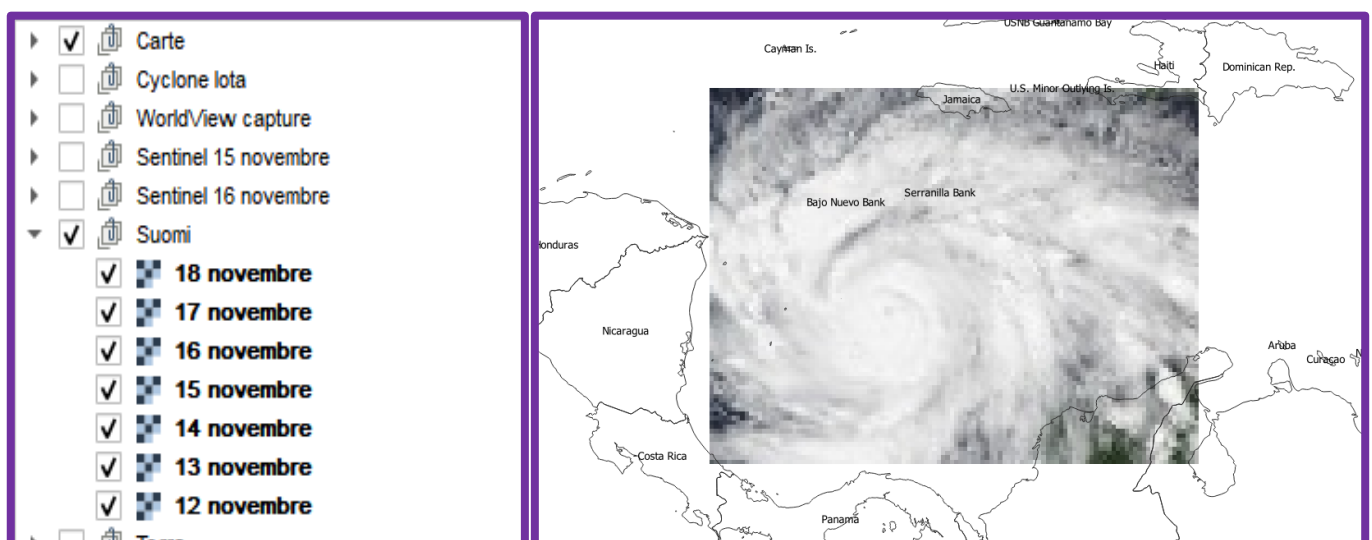
1. Ouvrir le Projet Iota dans QGIS situé dans le dossier Activité 2 du dossier AC1



2. Rendre visibles les images basses résolution du satellite Suomi pour les différentes dates en cochant le groupe Suomi

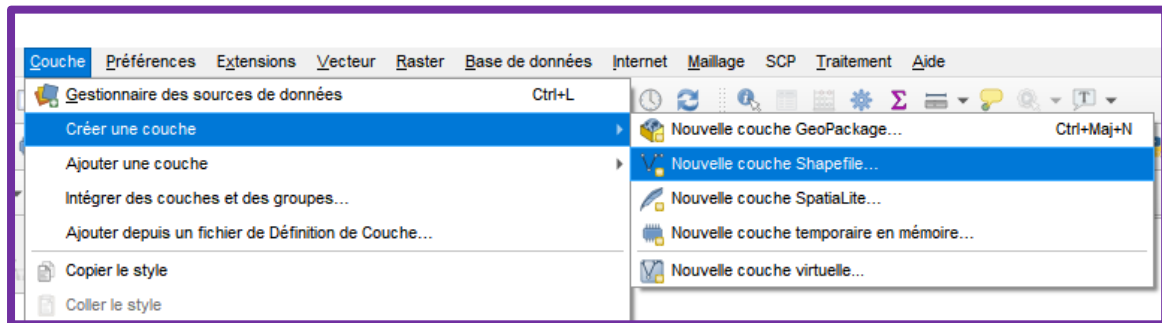


3. Afficher une par une les différentes dates proposées



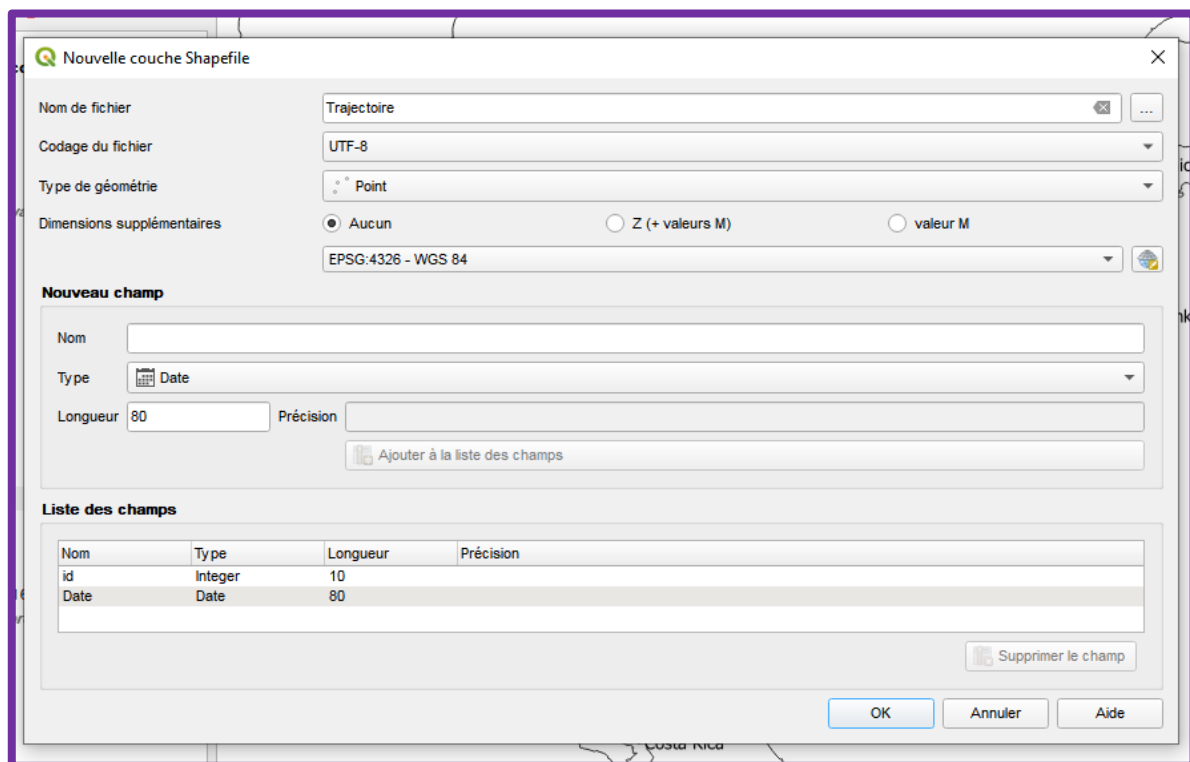
## On va matérialiser la position du cyclone aux différentes dates en créant un fichier vectoriel

4. Aller dans Couche puis Créer une Couche puis Nouvelle couche Shapefile



5. Dans la fenêtre qui s'ouvre compléter les éléments suivants :

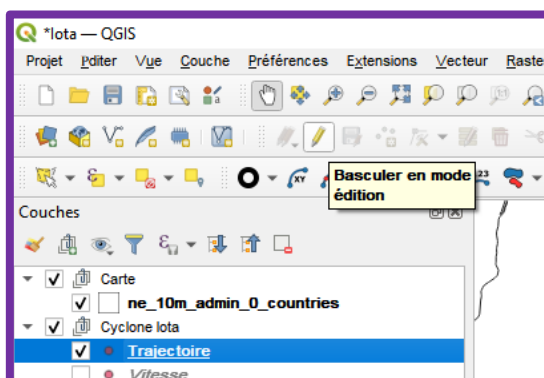
- Choisir un emplacement et le nom Trajectoire pour le fichier qui va être créé en cliquant sur le bouton du menu Nom de Fichier
- Créer un champ d'information
  - Entrer le nom Date dans la fenêtre Nom
  - Sélectionner Date dans Type
  - Cliquer sur le bouton Ajouter à la liste des champs
- Cliquer sur OK



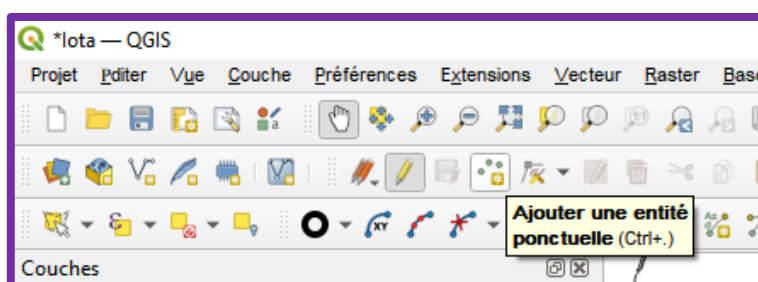
**La couche est créée, elle apparaît dans la colonne de gauche**

On va ensuite positionner les différents points correspondant à la position à chaque date du cyclone

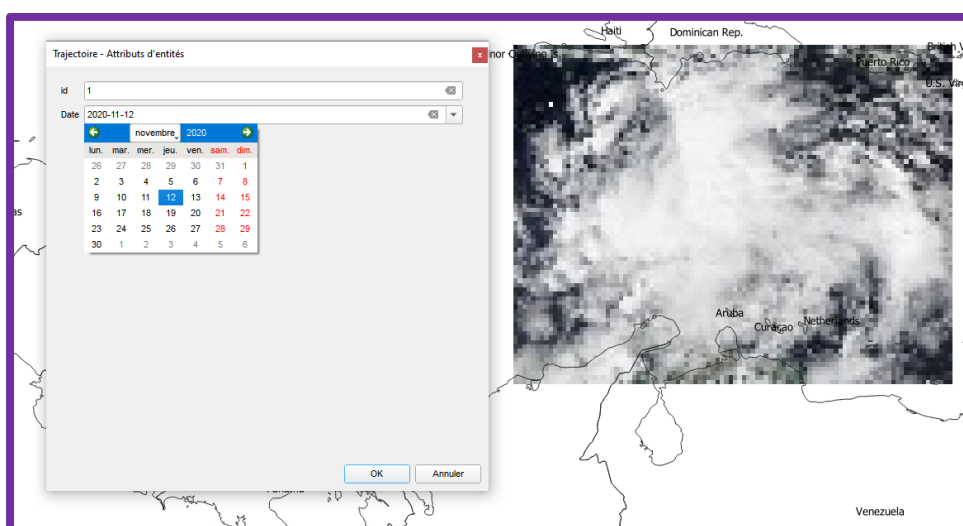
6. Sélectionner la couche que vous venez de créer en cliquant dessus dans la colonne de gauche
7. Cliquer dans la barre d'outils sur l'icône (petit crayon) Basculer en mode édition.



8. Dans les nouveaux icones actifs, sélectionner Ajouter une entité ponctuelle

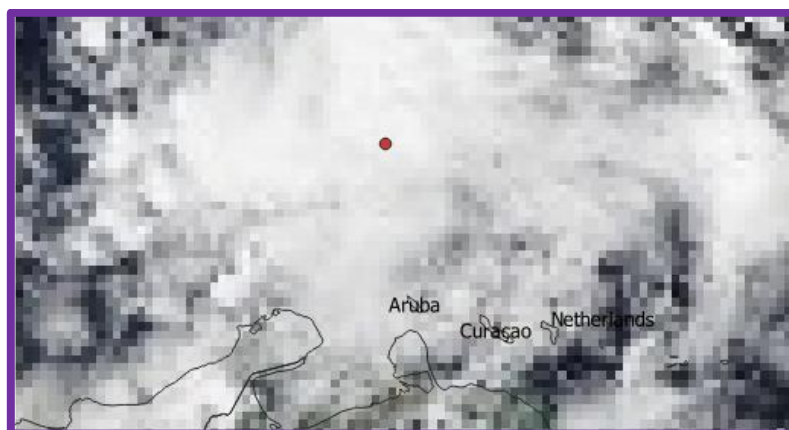


9. Afficher uniquement l'image satellite SUOMI d'une date en utilisant les outils de visibilité
10. A partir de cette image, repérer l'œil du cyclone, et cliquer sur l'image dans la zone en question
11. Dans la fenêtre qui s'ouvre :
  - Donner une valeur (1 par exemple pour la première date) dans la fenêtre Id
  - Choisir la date dans la fenêtre Date

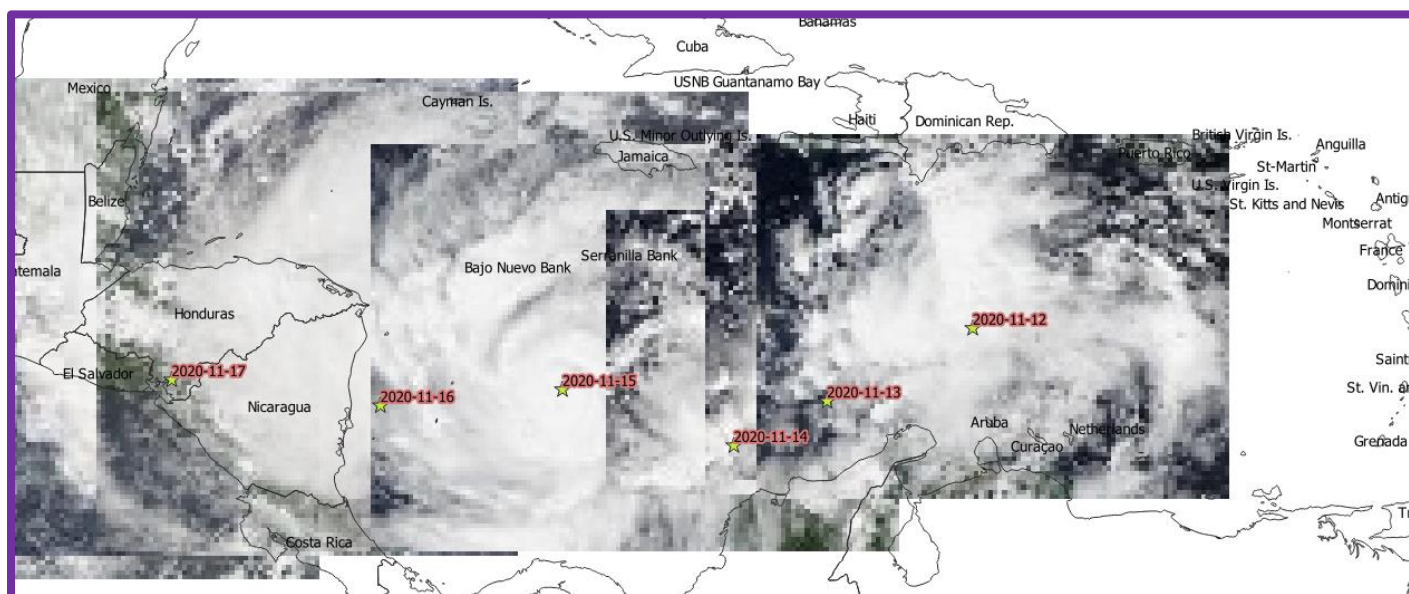




12. Procéder de la même manière pour les différentes dates

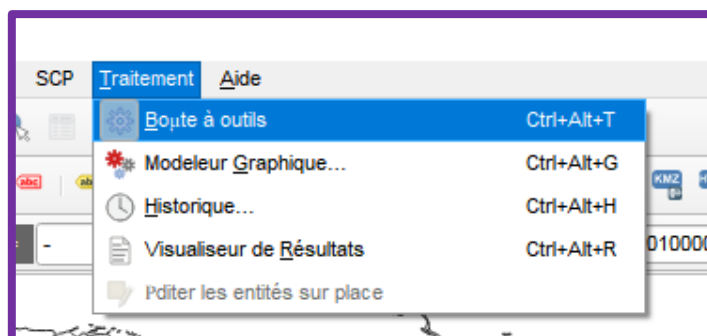


13. Quitter le mode édition en cliquant dans la barre d'outils sur l'icône (petit crayon) Basculer en mode édition.

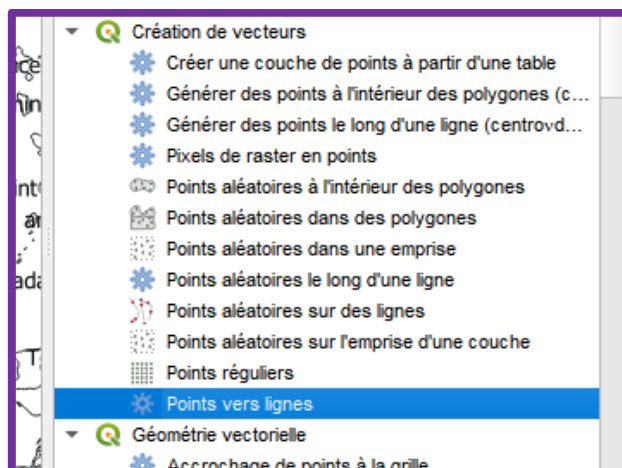


**On va ensuite générer une nouvelle couche vectorielle mais cette fois ci sous la forme d'une ligne matérialisant la trajectoire passant par les différents points préalablement définis dans la couche vectorielle précédente (trajectoire)**

14. Aller dans Traitement puis Boite à outils

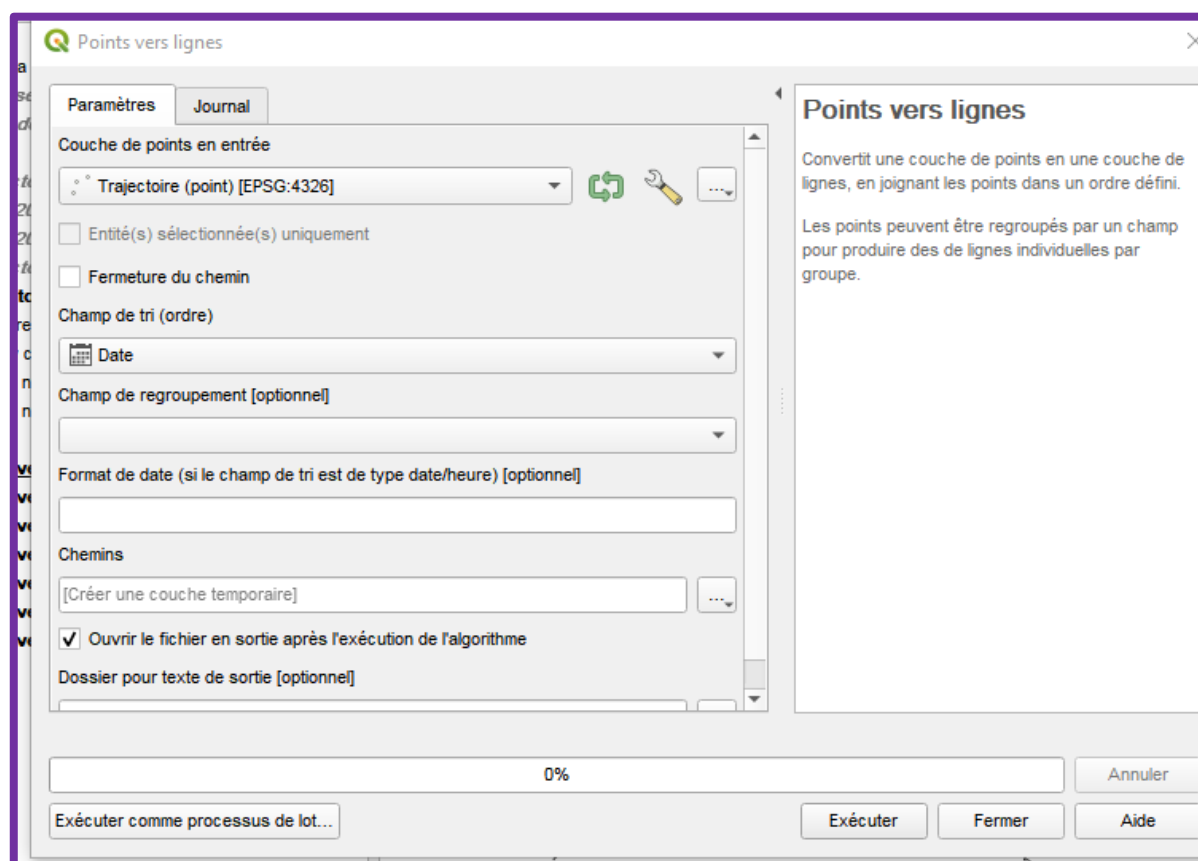


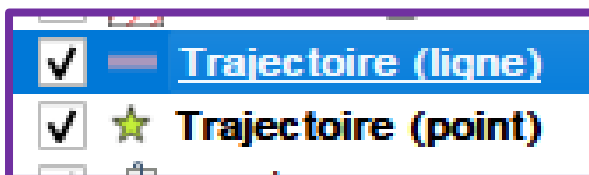
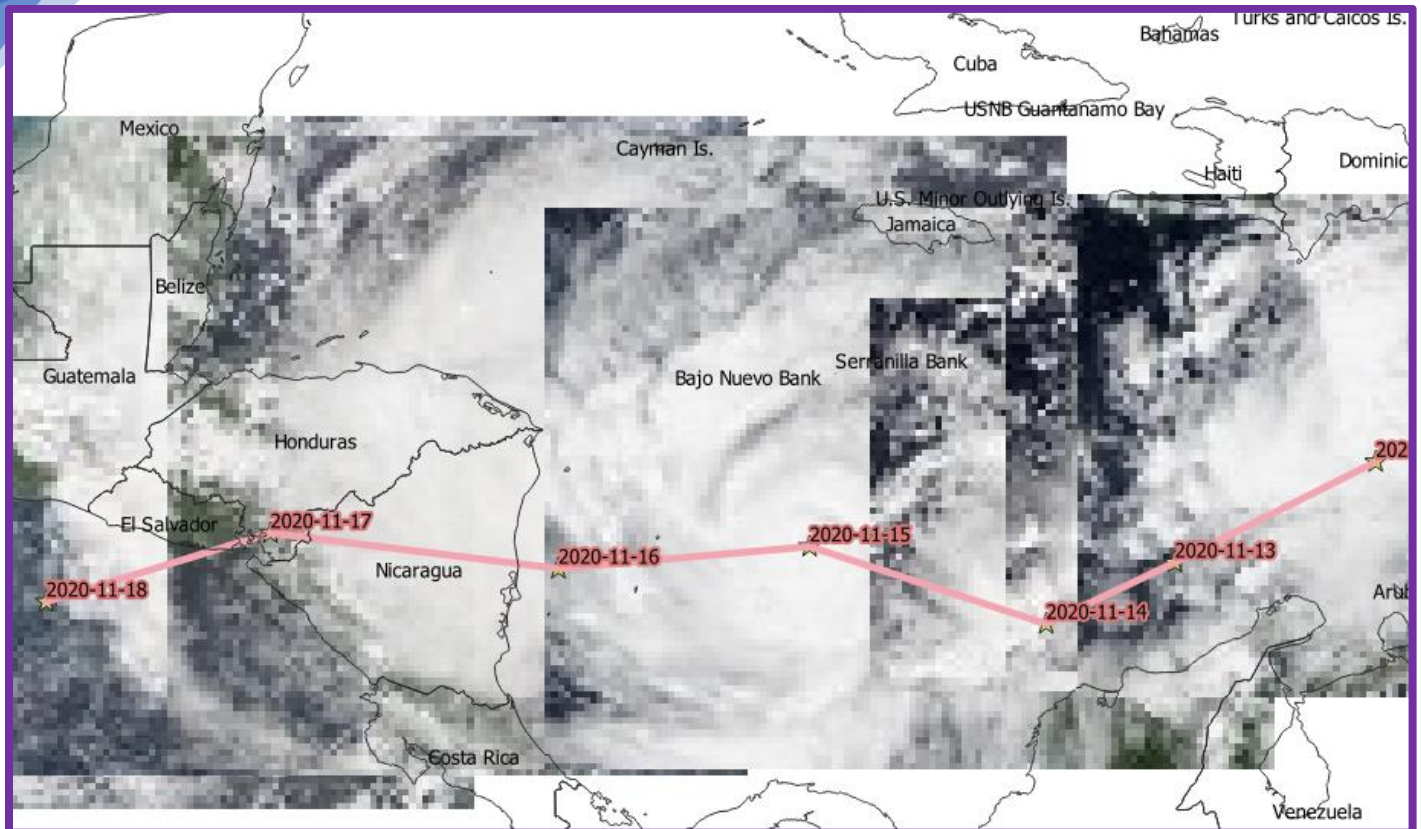
15. Dans la colonne de gauche, sélectionner *Points vers ligne*



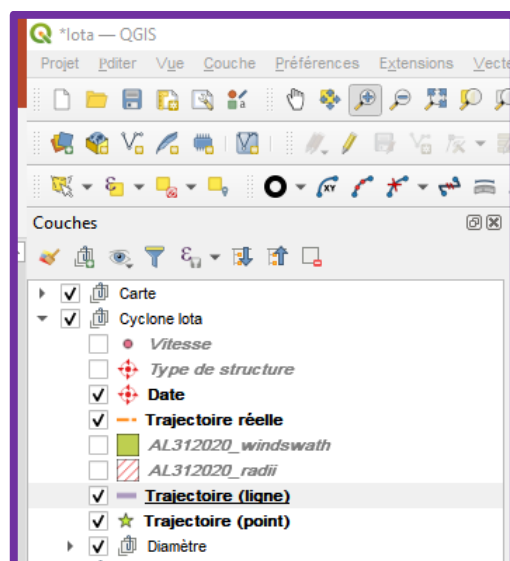
16. Dans la fenêtre qui s'ouvre

- Sélectionner la couche *Trajectoire* dans la fenêtre *Couches de points d'entrée*
- Sélectionner *Date* dans *Champs de tri(ordre)*
- Donner un nom : *Trajectoire (ligne)* et un dossier de destination dans la fenêtre *Chemin*
- Cliquer sur *Exécuter*



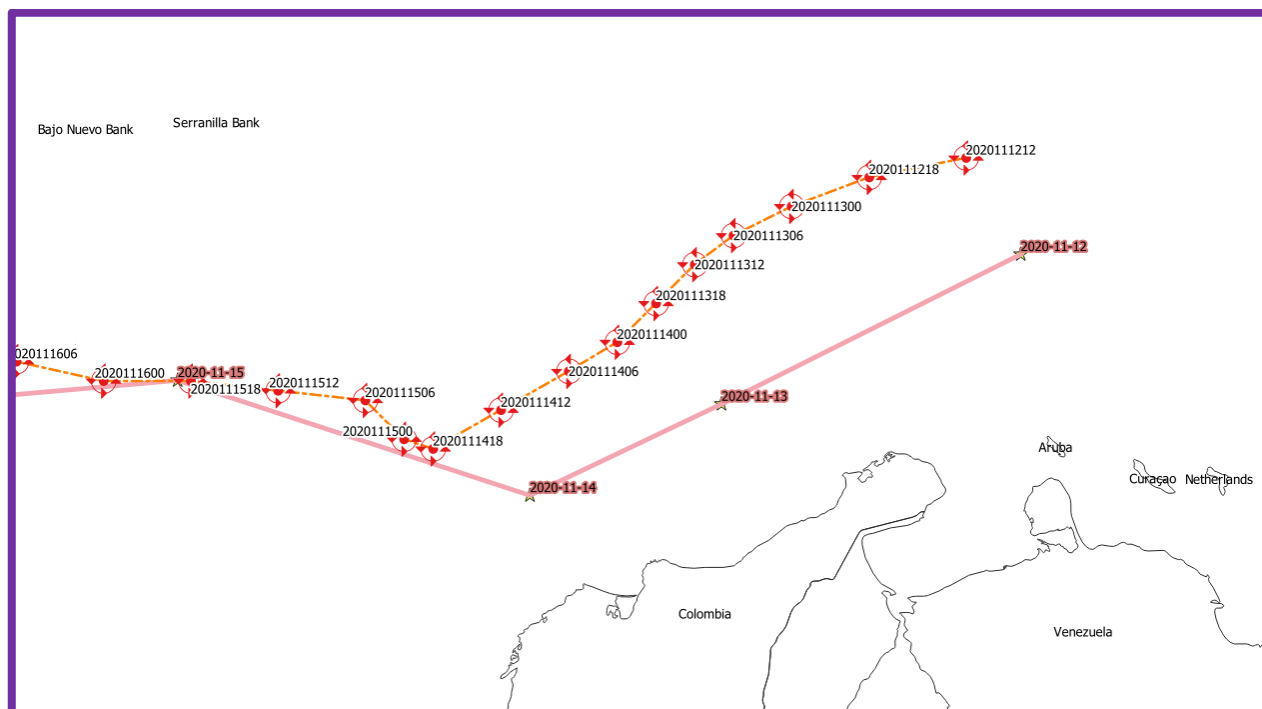


17. Dans la colonne de gauche, rendre visible la couche Trajectoire réelle et Date



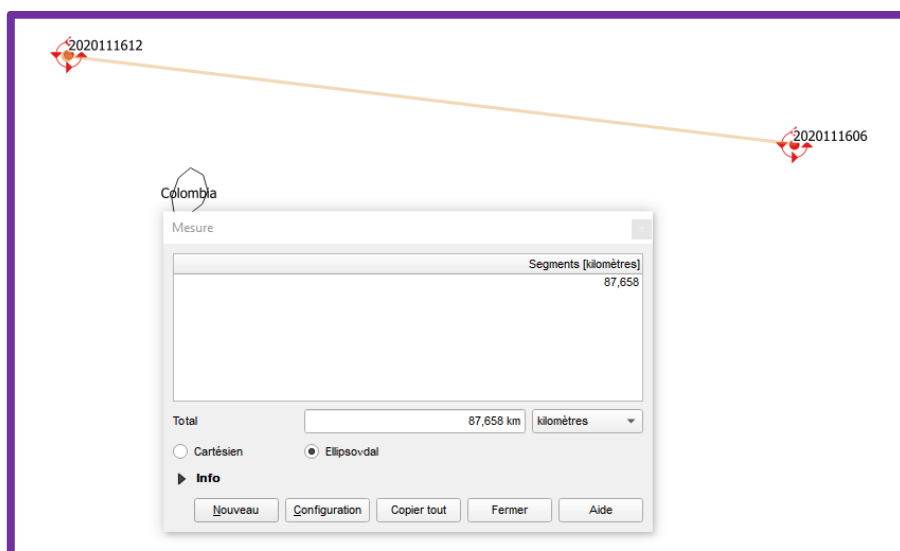
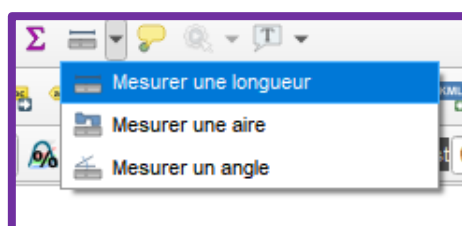
On dispose de la trajectoire suivie par ce cyclone. Les valeurs indiquées correspondent à la date et à l'heure correspondant à la localisation du cyclone

### 18. Comparer cette trajectoire avec la votre



### Activité 2 : Vitesse de déplacement d'un cyclone

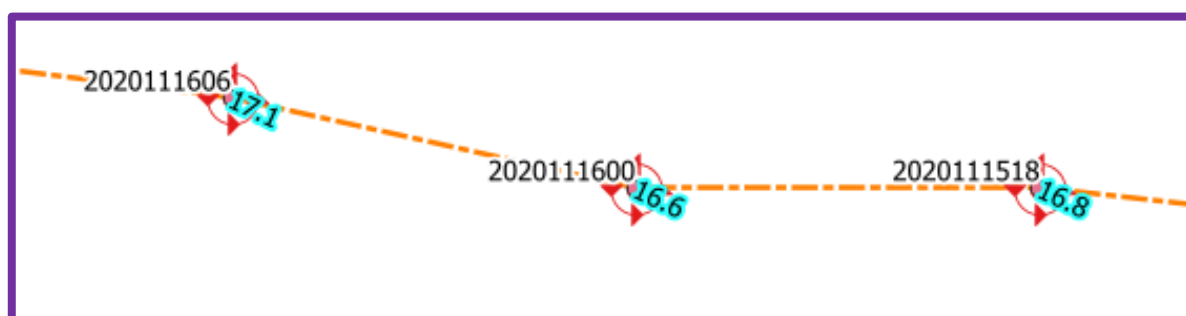
1. *Rendre invisibles les couches trajectoires et trajectoires (ligne)*
2. *Utiliser l'outil Mesurer une longueur après avoir cliqué sur l'icone Mesure pour déterminer la distance entre chaque localisation*





3. Réaliser un tableau recensant l'évolution de la vitesse de déplacement du cyclone au cours de son déplacement vers le continent

STORMNAME	DTG	MSLP	STORMTYPE	INTENSITY	SS	LAT	LON	Distance	Vitesse
INVEST	2020111212	1009	LO	25	0	15,5	-70,9	0	0,0
INVEST	2020111218	1009	LO	25	0	15,3	-71,9	113,2	18,9
INVEST	2020111300	1008	LO	25	0	15	-72,7	94,8	15,8
INVEST	2020111306	1007	LO	25	0	14,7	-73,3	74,5	12,4
THIRTY-ONE	2020111312	1006	TD	30	0	14,4	-73,7	55,5	9,3
THIRTY-ONE	2020111318	1005	TS	35	0	14	-74,1	62,8	10,5
IOTA	2020111400	1005	TS	35	0	13,6	-74,5	62,8	10,5
IOTA	2020111406	1004	TS	35	0	13,3	-75	64,7	10,8
IOTA	2020111412	1002	TS	40	0	12,9	-75,7	89,5	14,9
IOTA	2020111418	997	TS	45	0	12,5	-76,4	89,5	14,9
IOTA	2020111500	992	TS	55	0	12,6	-76,7	35,1	5,9
IOTA	2020111506	988	HU	65	1	13	-77,1	62,8	10,5
IOTA	2020111512	982	HU	70	1	13,1	-78	100,5	16,8
IOTA	2020111518	974	HU	75	1	13,2	-78,9	100,5	16,8
IOTA	2020111600	961	HU	90	2	13,2	-79,8	99,9	16,6
IOTA	2020111606	935	HU	120	4	13,4	-80,7	102,3	17,1
IOTA	2020111612	917	HU	135	4	13,5	-81,5	89,5	14,9
IOTA	2020111618	918	HU	130	4	13,5	-82,3	88,8	14,8
IOTA	2020111700	918	HU	130	4	13,6	-83	78,5	13,1
IOTA	2020111706	935	HU	110	3	13,7	-83,8	89,5	14,9
IOTA	2020111712	965	HU	75	1	13,7	-84,7	99,9	16,7
IOTA	2020111718	988	TS	55	0	13,7	-85,7	111,0	18,5
IOTA	2020111800	1000	TS	40	0	13,8	-86,7	111,6	18,6
IOTA	2020111806	1005	TS	35	0	13,8	-87,8	122,1	20,3
IOTA	2020111812	1006	TD	25	0	13,7	-89	133,7	22,3

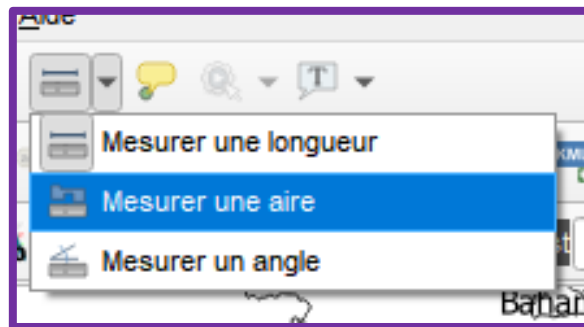


### Activité 3 : Mesurer l'extension d'un cyclone

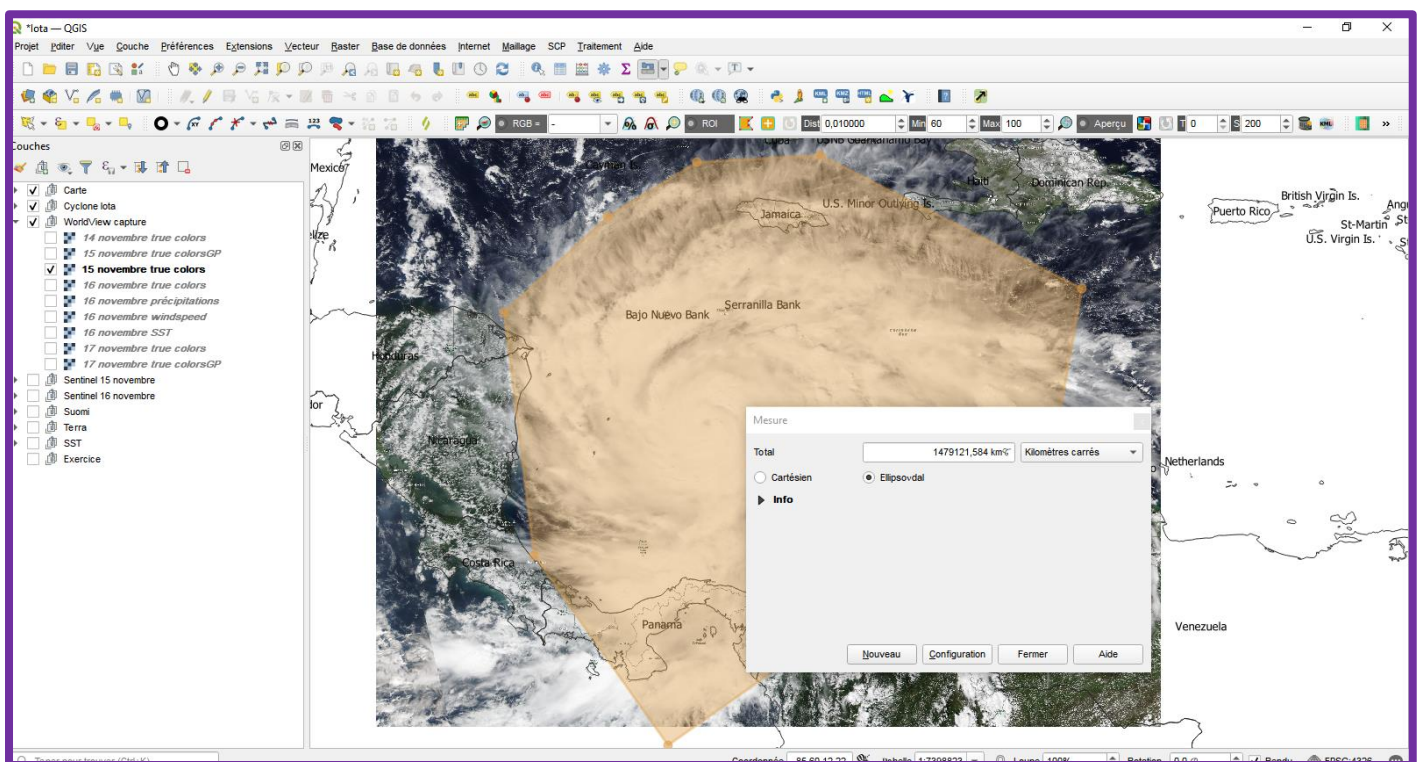
1. Rendre visible uniquement la couche 15 novembre true colors situé dans le groupe Extension

<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	14 novembre true colors
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15 novembre true colorsGP
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	15 novembre true colors
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	16 novembre true colors
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	16 novembre précipitations
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	16 novembre windspeed
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	16 novembre SST
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17 novembre true colors
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17 novembre true colorsGP

2. Utiliser l'outil Mesurer une longueur après avoir cliqué sur l'icône Mesure pour déterminer le rayon du cyclone
3. Utiliser l'outil Mesurer une aire après avoir cliqué sur l'icône Mesure pour déterminer la surface cyclone



4. Effectuer un travail similaire aux autres dates. Discuter de l'évolution de ces paramètres

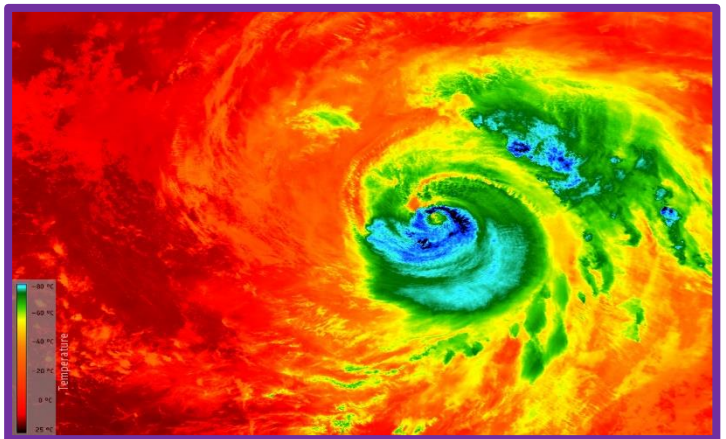
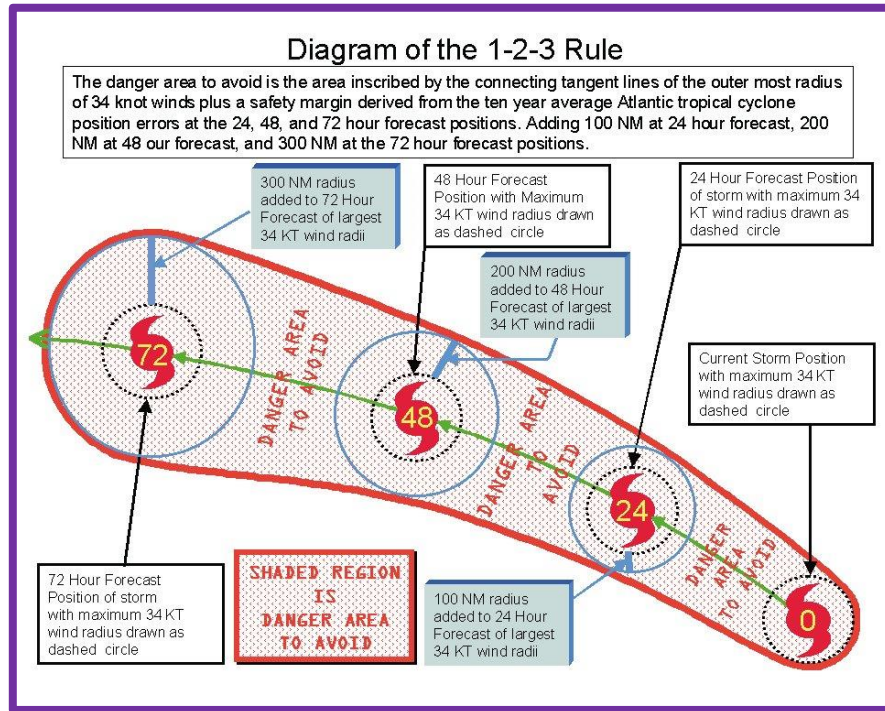


#### Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone

Le pouvoir destructeur des cyclones est lié aux vitesses des vents au sein de la structure. Il est possible d'estimer la vitesse des vents et l'extension des zones de vents à partir de l'imagerie satellite. Le rayon du vent maximum (RMW) est la distance entre le centre d'un cyclone et sa bande de vents les plus forts. C'est un paramètre dans la dynamique atmosphérique et la prévision des cyclones tropicaux. Les taux de précipitations les plus élevés se produisent près du RMW des cyclones tropicaux. L'étendue de l'onde de tempête d'un cyclone et son intensité potentielle maximale peuvent être déterminées à l'aide du RMW. À mesure que les vents soutenus maximaux augmentent, le RMW diminue.

Le RMW est traditionnellement mesuré par des avions de reconnaissance. Il peut également être déterminé sur les cartes météorologiques comme la distance entre le centre du cyclone et le plus grand gradient de pression du système. A l'aide de données satellitaires météorologiques, la distance entre la température de sommet des nuages

la plus froide et la température la plus chaude à l'intérieur de l'œil, dans l'imagerie satellite infrarouge, est une méthode de détermination de la RMW. La raison pour laquelle cette méthode fonctionne est que les vents les plus forts dans les cyclones tropicaux ont tendance à être situés sous la convection la plus profonde, qui est considérée sur l'imagerie satellite comme les sommets de nuages les plus froids. L'utilisation des données de vitesse du radar météorologique Doppler peut également être utilisée pour déterminer cette quantité, tant pour les tornades que pour les cyclones tropicaux près de la côte.



L'étendue extérieure du vent se déplaçant autour d'un ouragan est rarement uniforme. La taille de ce champ de vent est souvent inclinée vers le côté droit de la progression de la tempête vers l'avant. Dans le même temps, la taille de chaque cyclone tropical varie.

Un cyclone, bien qu'il ne soit peut-être pas très puissant, pourrait avoir un grand champ de vent et être appelé une « grande » tempête. Au contraire d'autres cyclones pourraient être très puissants mais compacts

En ce qui concerne les cyclones de l'Atlantique, le National Hurricane Center américain émet quatre fois par jour une prévision qui fournit l'étendue des divers champs de vent.

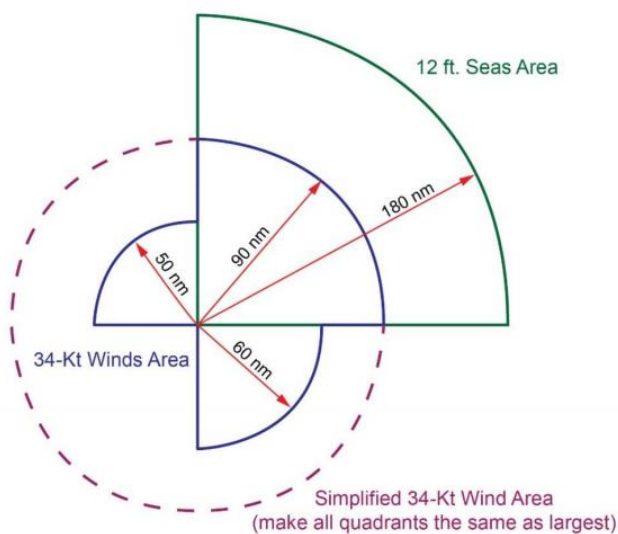
Ces valeurs de distance sont divisées en quadrants et fournissent une information sur la taille et la gravité des tempêtes.

On utilise une représentation appelé en quadrants pour afficher ces valeurs



**Figure # 3: The 34-knot wind radius data as compiled from the "advisory & synoptic positions" information for TROPICAL STORM EARNESTO- ADVISORY # 9; the 34 knot wind radius drawn will be 90 nm from the center as illustrated for easier construction & viewing (the NE quadrant being the largest and made equal for all quadrants, regardless how small the other quadrant's 34 knot wind radius are). Note that the 12 foot seas radii are not only be available in any of the sequential forecast segments.**

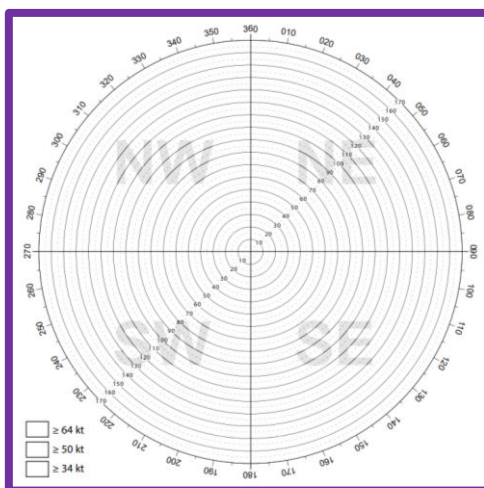
ESTIMATED MINIMUM CENTRAL PRESSURE 1002 MB  
 MAX SUSTAINED WINDS 45 KT WITH GUSTS TO 55 KT.  
 34 KT..... 90NE 60SE 0SW 50NW.  
 12 FT SEAS..180NE 0SE 0SW 0NW.  
 WINDS AND SEAS VARY GREATLY IN EACH QUADRANT. RADII IN NAUTICAL MILES ARE THE LARGEST RADII EXPECTED ANYWHERE IN THAT QUADRANT.



### A partir de l'avis d'alerte du cyclone Iota pour le 15 novembre

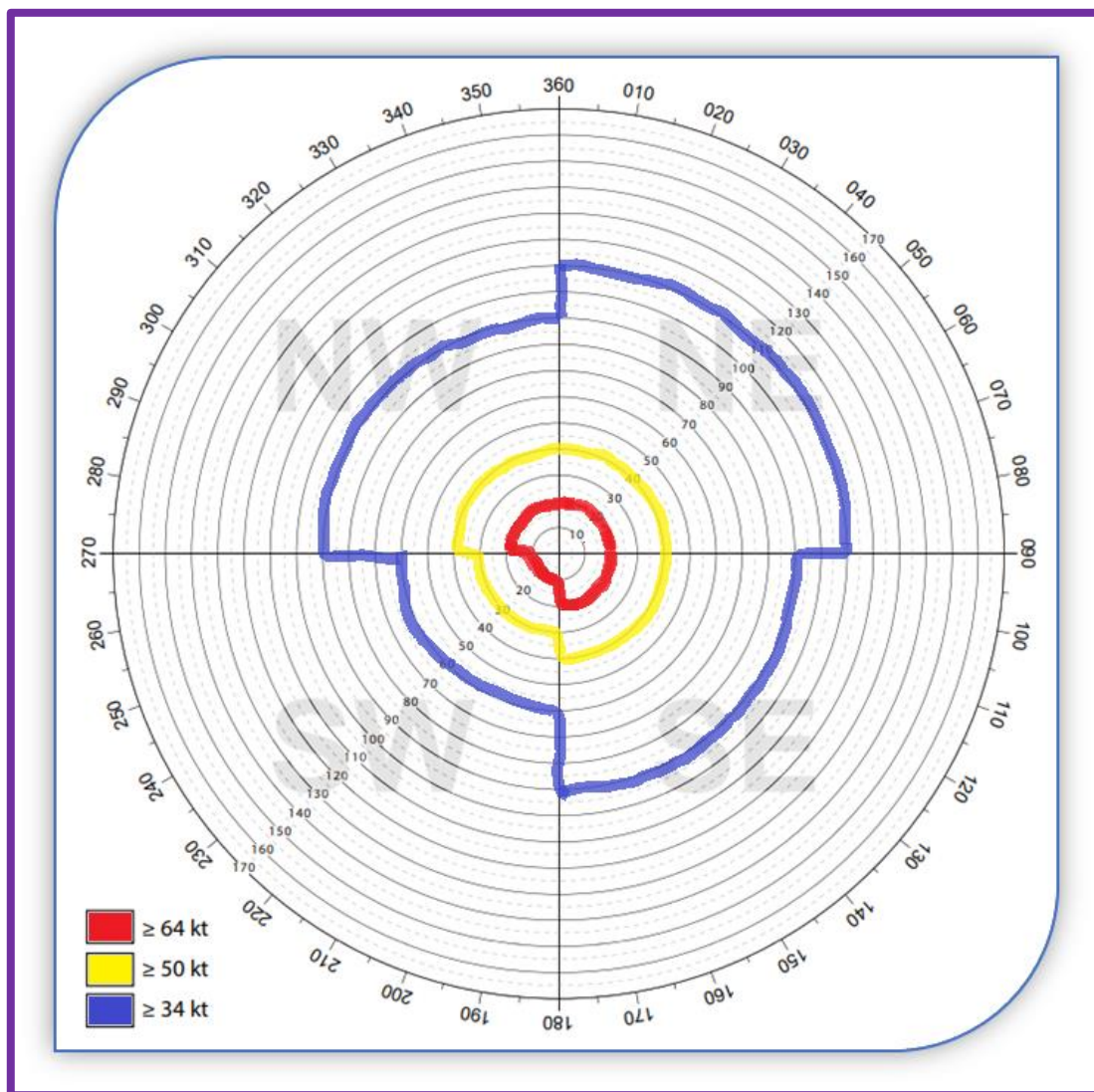
ESTIMATED MINIMUM CENTRAL PRESSURE 974 MB  
 MAX SUSTAINED WINDS 80 KT WITH GUSTS TO 100 KT.  
 64 KT..... 20NE 20SE 10SW 20NW.  
 50 KT..... 40NE 40SE 30SW 40NW.  
 34 KT.....110NE 90SE 60SW 90NW.  
 12 FT SEAS..180NE 90SE 75SW 150NW.  
 WINDS AND SEAS VARY GREATLY IN EACH QUADRANT. RADII IN NAUTICAL MILES ARE THE LARGEST RADII EXPECTED ANYWHERE IN THAT QUADRANT.

1. À l'aide d'une couleur, à partir des rayons du quadrant de 64 kt tracez des lignes le long du rayon dans chaque quadrant en commençant par le quadrant nord-est

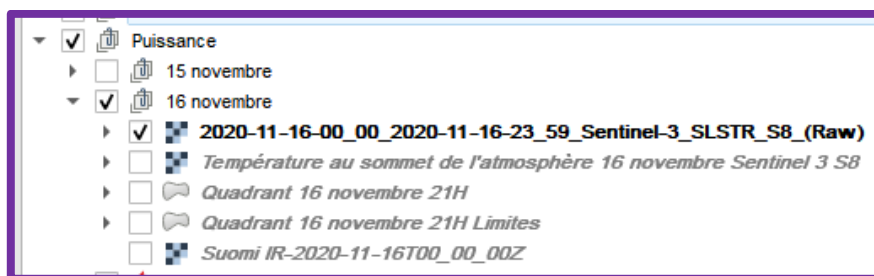




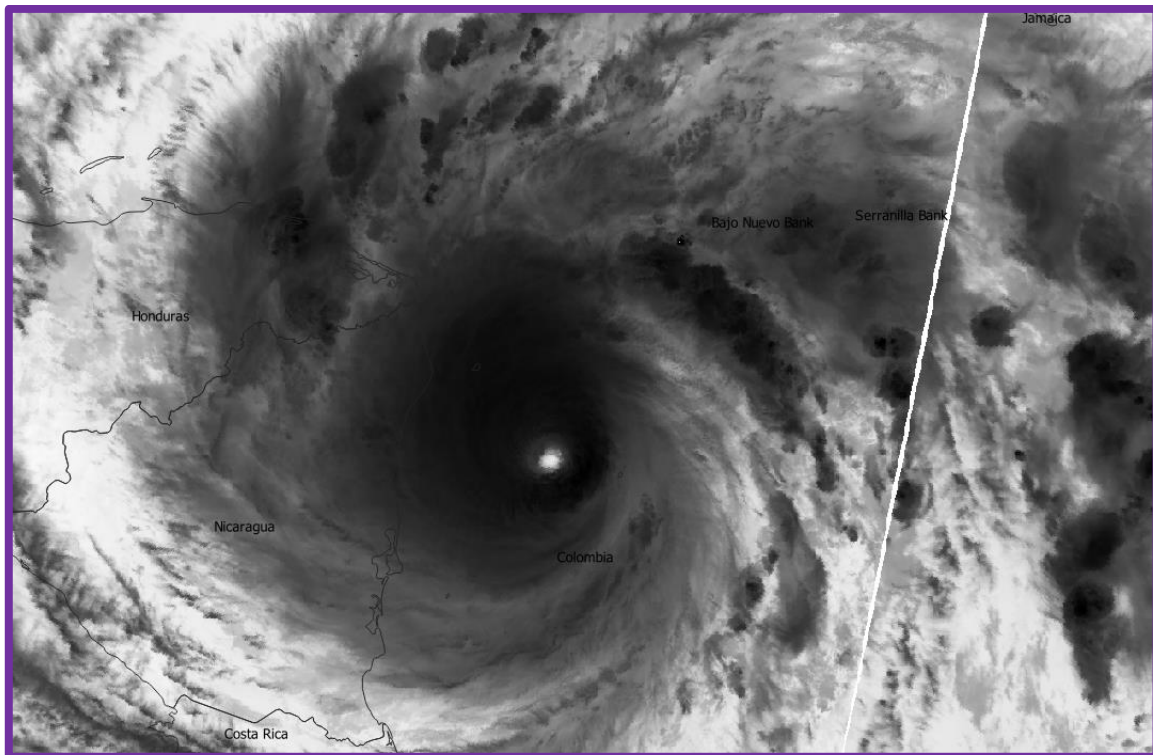
2. Connectez les extrémités de chaque « arc » en dessinant le long de chaque rayon.
3. Répétez les deux étapes précédentes en utilisant les valeurs de rayons de 50 kt puis en utilisant les valeurs de rayons de 34 kt.



4. Rendre visible le groupe Puissance dans la colonne de gauche. Zoomer sur la couche visible

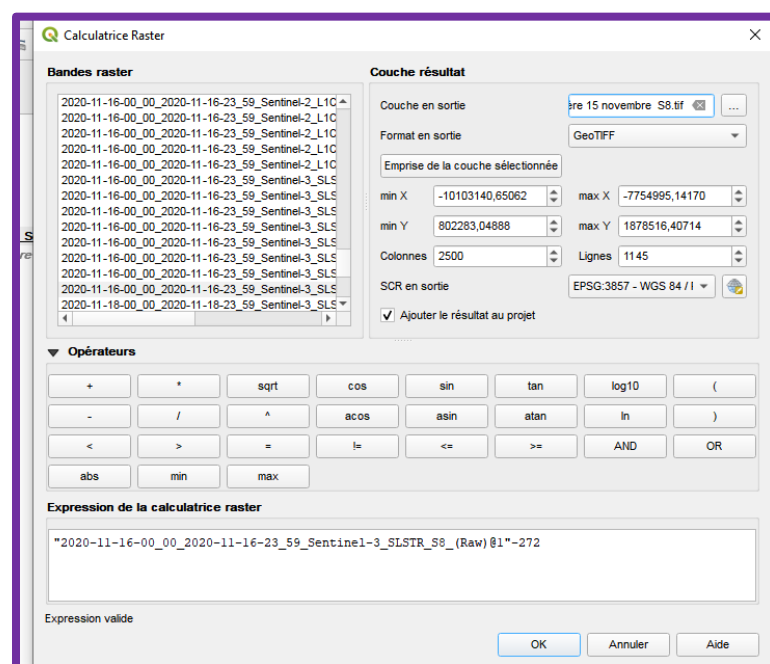


La couche correspond à la mesure réalisée au sein du domaine infrarouge par le satellite Sentinel 3 (bande S8). Pour chaque pixel l'intensité du gris est proportionnelle à la mesure qui est ici en Kelvin (il s'agit donc en fait d'une mesure de la température)

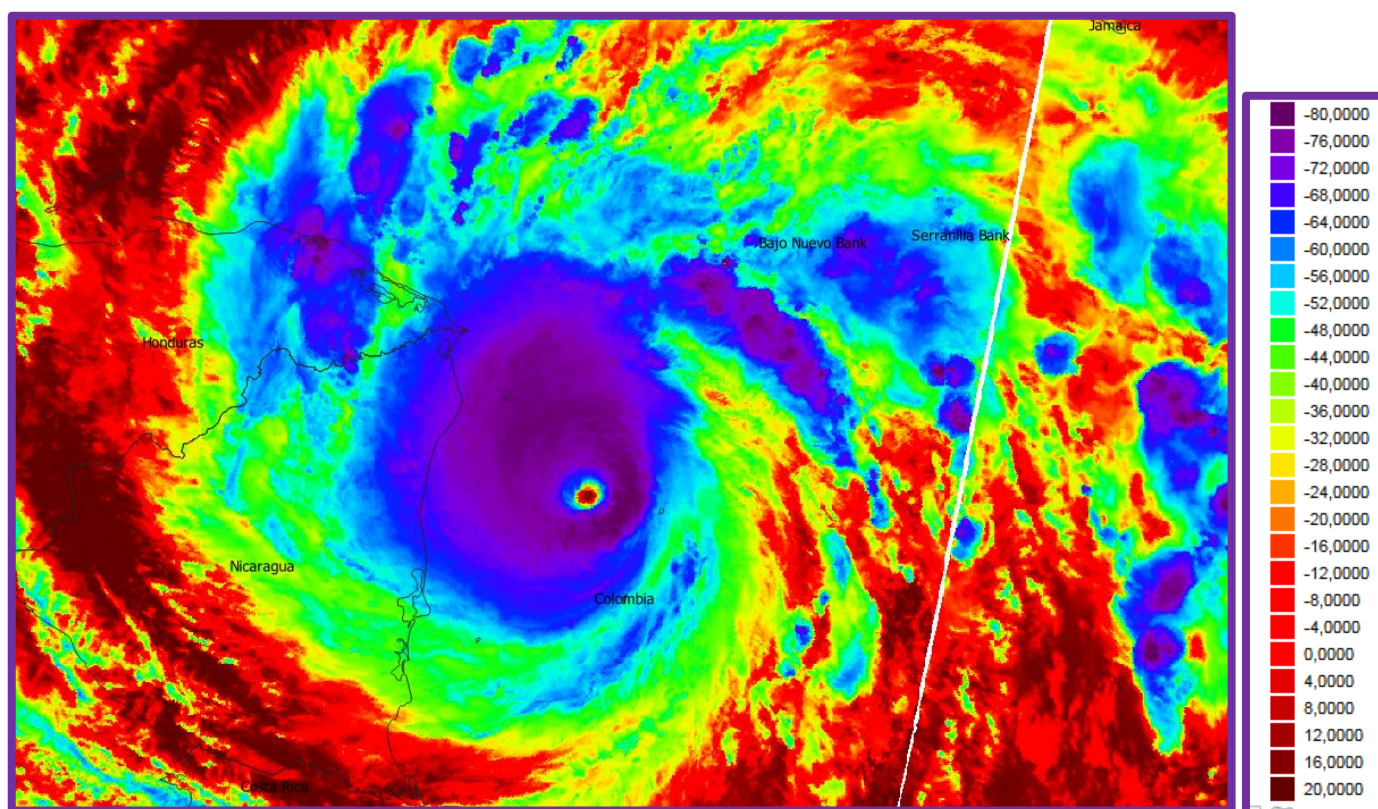
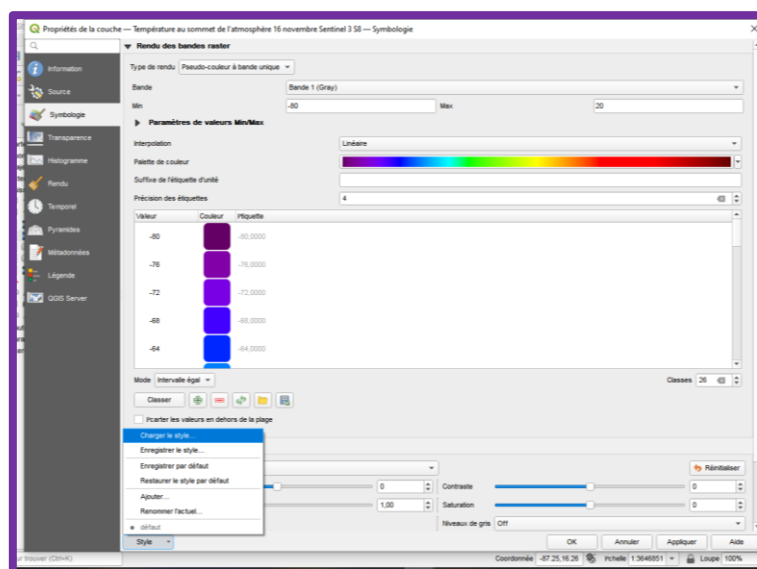


##### 5. Aller dans RASTER puis CALCULATRICE RASTER.

- Entrer la formule suivante dans Expression de la calculatrice RASTER : "2020-11-16-00\_00\_2020-11-16-23\_59\_Sentinel-3\_SLSTR\_S8\_(Raw)@1"-272
- Choisir un nom : Température au sommet de l'atmosphère 16 novembre et un répertoire de sortie à l'aide du bouton situé près de la fenêtre Couche de sortie
- Cliquer sur OK



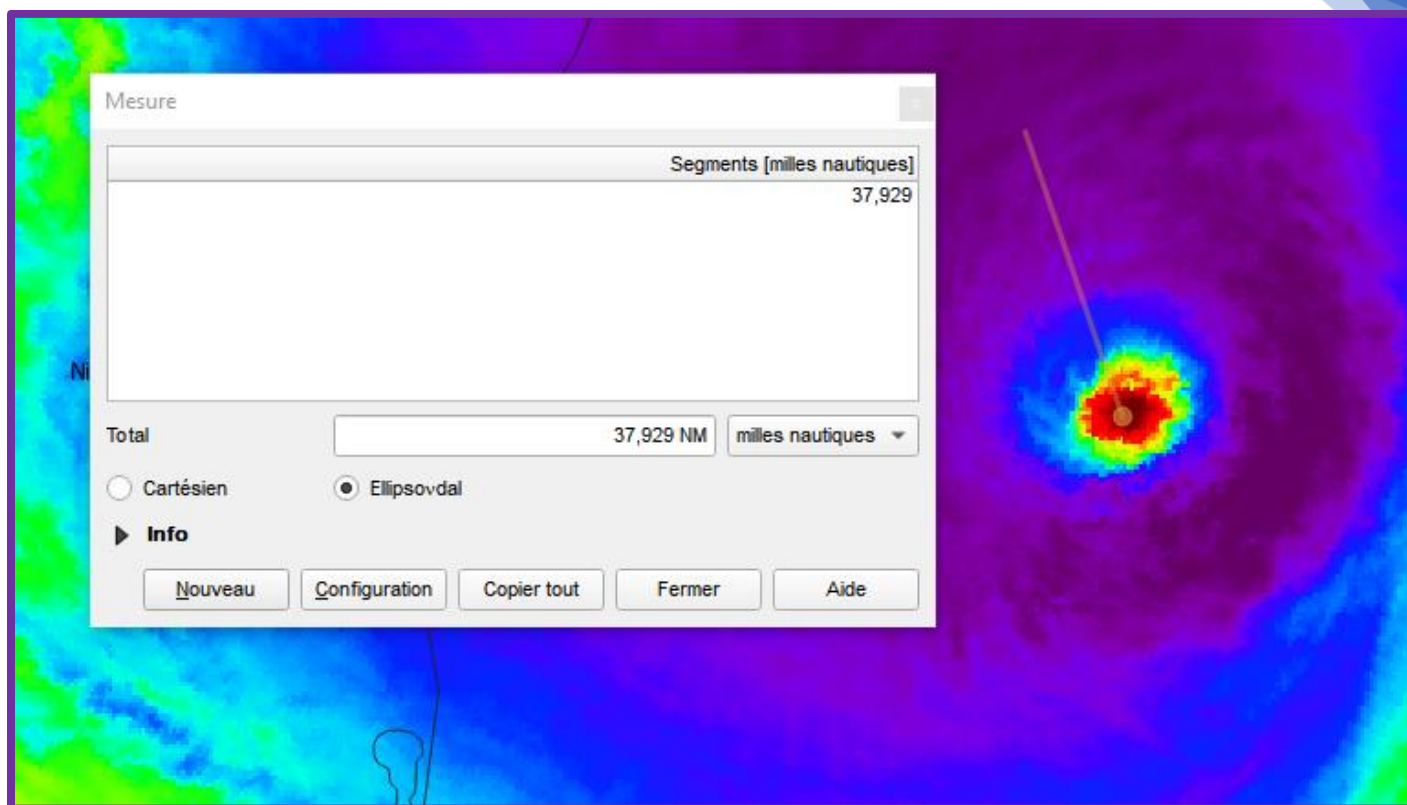
6. Double cliquer sur le nom de ce nouveau fichier, sélectionner l'onglet Symbologie puis cliquer sur le bouton Style puis Charger un style. Sélectionner le fichier Température de brillance situé dans le dossier Puissance de votre dossier de travail



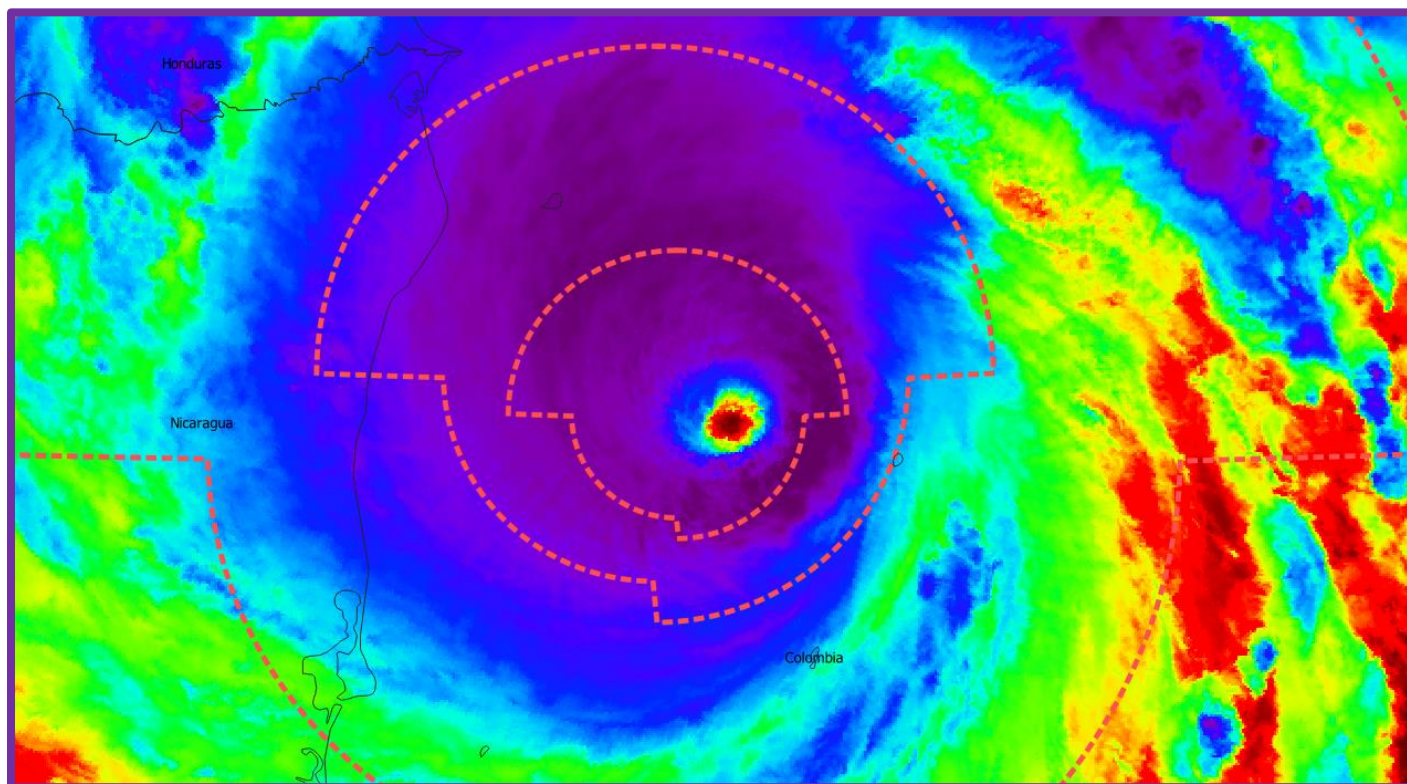
**On sait que « À l'aide de données satellitaires météorologiques, la distance entre la température de sommet des nuages la plus froide et la température la plus chaude à l'intérieur de l'œil, dans l'imagerie satellite infrarouge, est une méthode de détermination de la RMW. »**

7. Utiliser l'outil Mesurer une longueur après avoir cliquer sur l'icône Mesure pour proposer la valeur du RMW dans les différents quadrants





8. Afficher la couche Quadrant 16 novembre 21H et comparer avec vos résultats



#### 2.4.2 TEMPERATURE DE SURFACE DES OCEANS DES ZONES DE FORMATION



## 2.4.2.1 INFORMATIONS GENERALES

La cyclogenèse dépend essentiellement de deux facteurs : De la préexistence d'une dépression dans cette même zone et de La température de l'océan (au sein d'une zone suffisamment éloignée de l'équateur). La précision des mesures globales de la SST par satellite permet de suivre son évolution. Même si la période de mesures fiables est encore courte elle peut contribuer à enrichir les modèles. Des événements comme la Niña affecte significativement l'activité cyclonique. Ces événements propres à la variabilité interne peuvent être repérés depuis l'Espace par monitoring des températures de surface

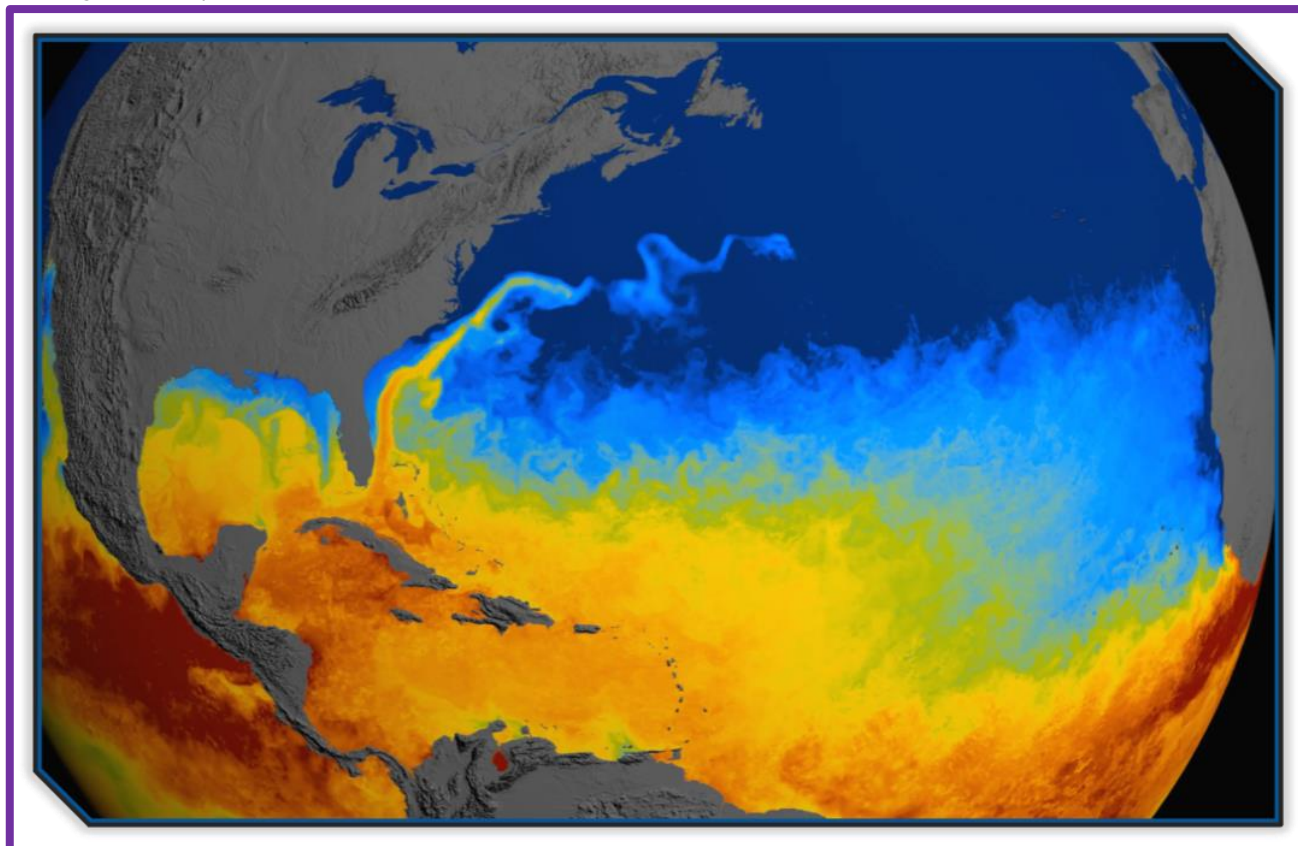


Figure 95 : Température de surface de l'Atlantique pendant la saison cyclonique 2020

La mesure de la température de surface des océans est déterminante. Son influence sur la formation et l'évolution des cyclones est fondamentale. Elle permet également une surveillance plus large de phénomènes climatiques susceptibles d'influencer l'activité cyclonique. Sa confrontation avec les statistiques cycloniques permettra de lever certaines incertitudes sur la cyclogenèse (gradient de température vs valeur absolue). Son évolution est décisive pour alimenter les modèles

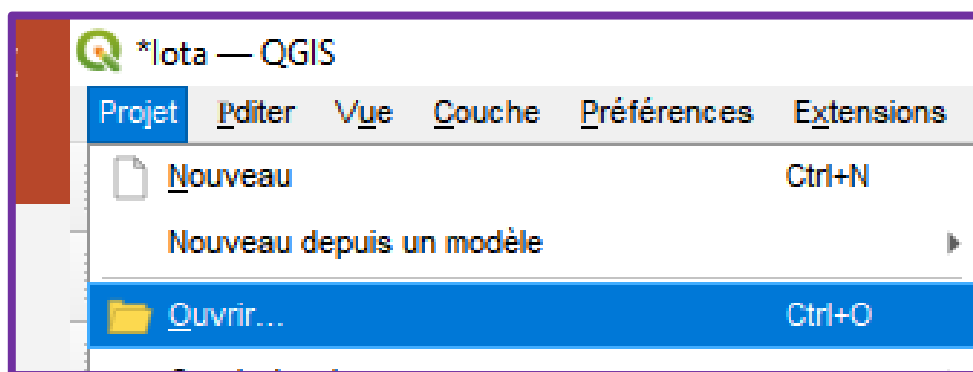
Les données sont disponibles, exploitables en documents ou en affichage sur un visualisateur en cas de géoréférencement. A chaque pixel étant attribué une valeur de température, il est possible de traiter ces données avec différents logiciels :

- ➔ Avec un tableur pour effectuer une approche statistique
- ➔ Avec un système d'Information Géographique, pour localiser cette approche statistique

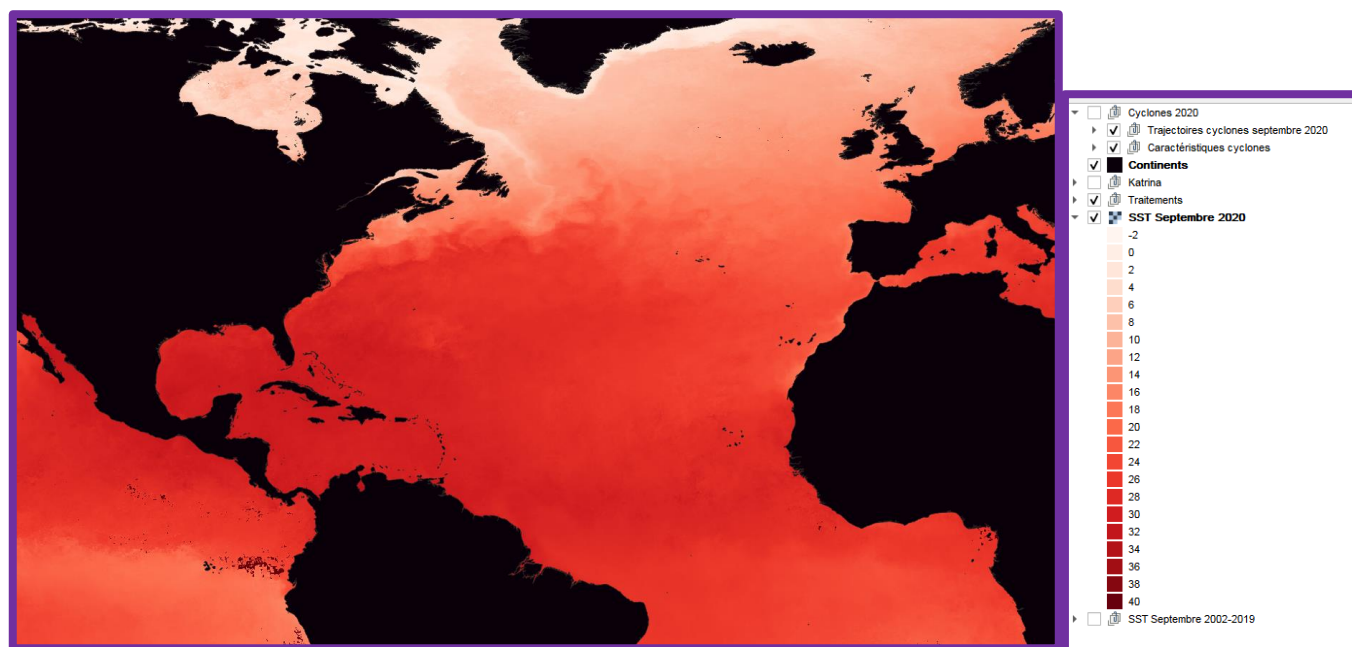
Il est par exemple possible de superposer 10 années de mesure d'une même région océanique un même mois d'une région et de faire calculer une température de surface moyenne puis d'ajouter une nouvelle année, et d'effectuer la comparaison pixel par pixel entre cette année et la valeur moyenne préalablement calculée. On définit ainsi la notion d'ANOMALIE

### 2.4.2.2 EXEMPLE D'UTILISATION DE DONNEES : TEMPERATURES DE SURFACE ET FORMATION D'UN CYCLONE

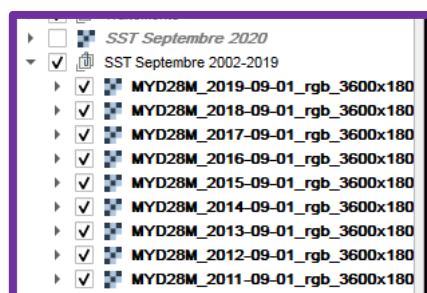
1. Ouvrir le Projet SST et cyclones dans QGIS situé dans le dossier Activité 2 du dossier AC1

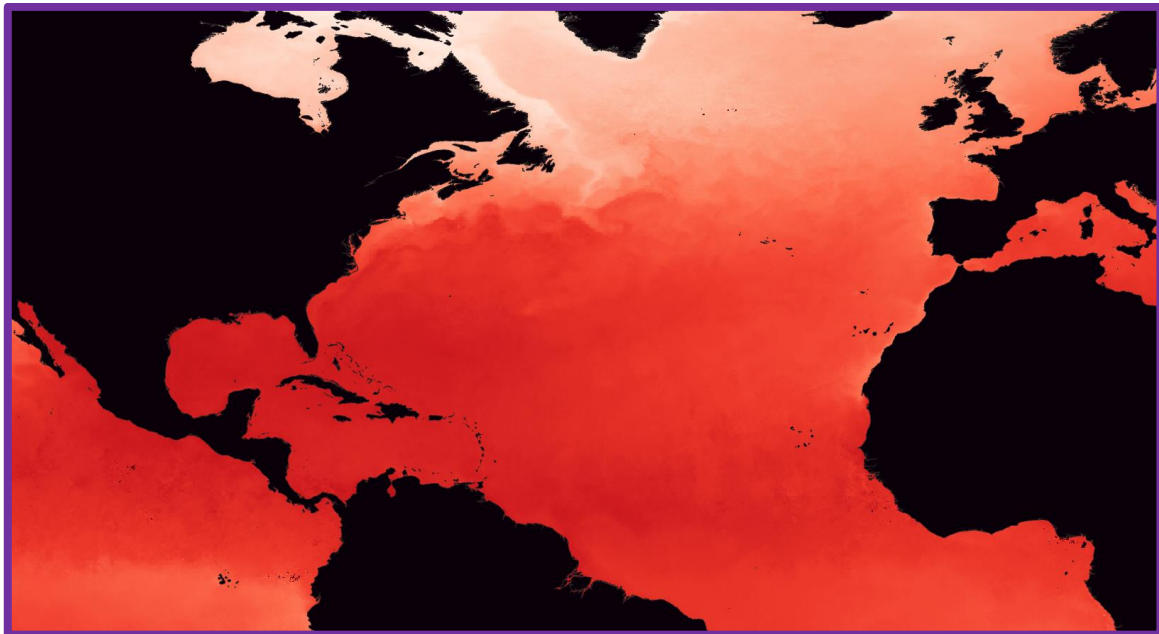


L'image qui s'affiche correspond aux mesures de températures moyennes de surface pour le mois de septembre 2020



2. Dans la colonne de gauche, utilisez les boutons de visibilité pour rendre invisible la couche de septembre 2020 et pour afficher le groupe d'image des mois de septembre entre 2002 et 2019



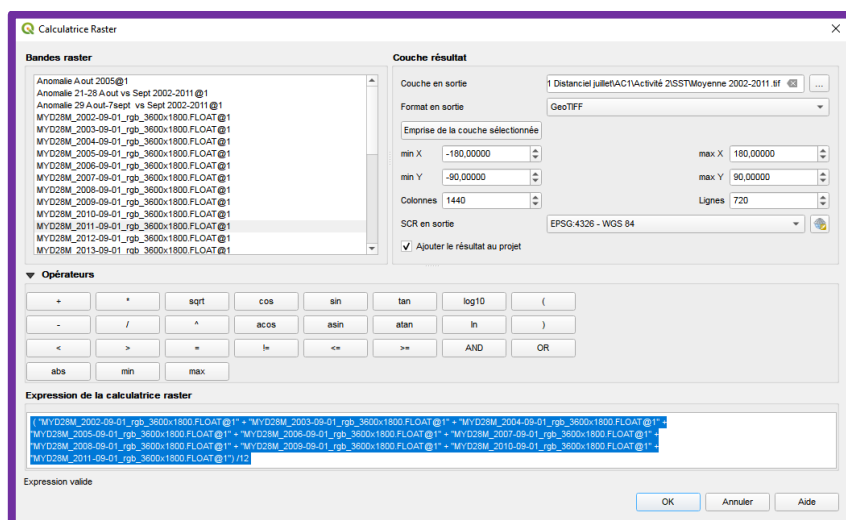


### 3. Aller dans RASTER puis CALCULATRICE RASTER.

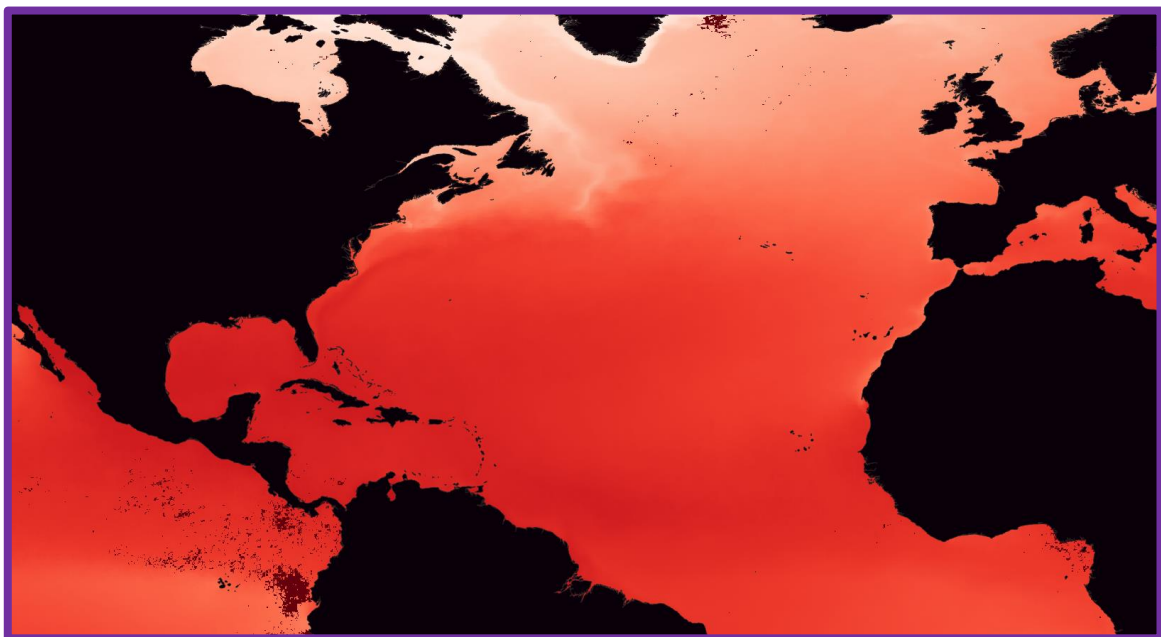
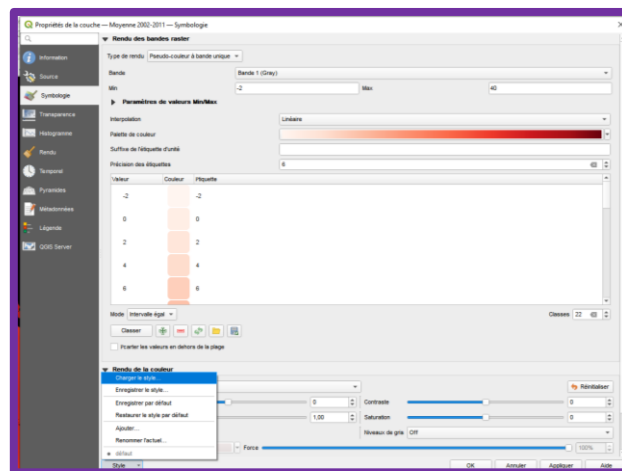
- Entrer la formule suivante dans Expression de la calculatrice RASTER :

```
(
"MYD28M_2002-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1" + "MYD28M_2003-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1" +
"MYD28M_2004-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1" + "MYD28M_2005-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1" +
"MYD28M_2006-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1" + "MYD28M_2007-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1" +
"MYD28M_2008-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1" + "MYD28M_2009-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1" +
"MYD28M_2010-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1" + "MYD28M_2011-09-01_rgb_3600x1800.FLOAT@1"
)/12
```

- Choisir un nom : Moyenne 2002-2011 et un répertoire de sortie à l'aide du bouton situé près de la fenêtre Couche de sortie
- Cliquer sur OK



4. Double cliquer sur le nom de ce nouveau fichier, sélectionner l'onglet Symbologie puis cliquer sur le bouton Style puis Charger un style. Sélectionner le fichier Moyenne 2010 de votre dossier de travail



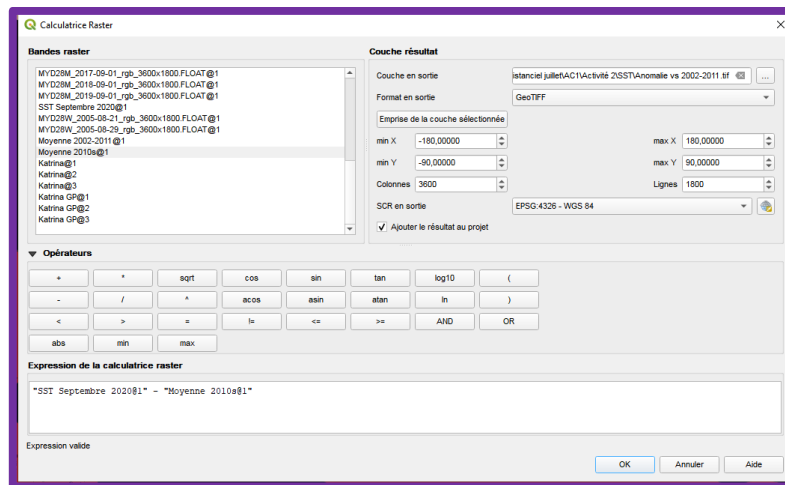
5. Aller dans RASTER puis CALCULATRICE RASTER.

- Entrer la formule suivante dans Expression de la calculatrice RASTER :

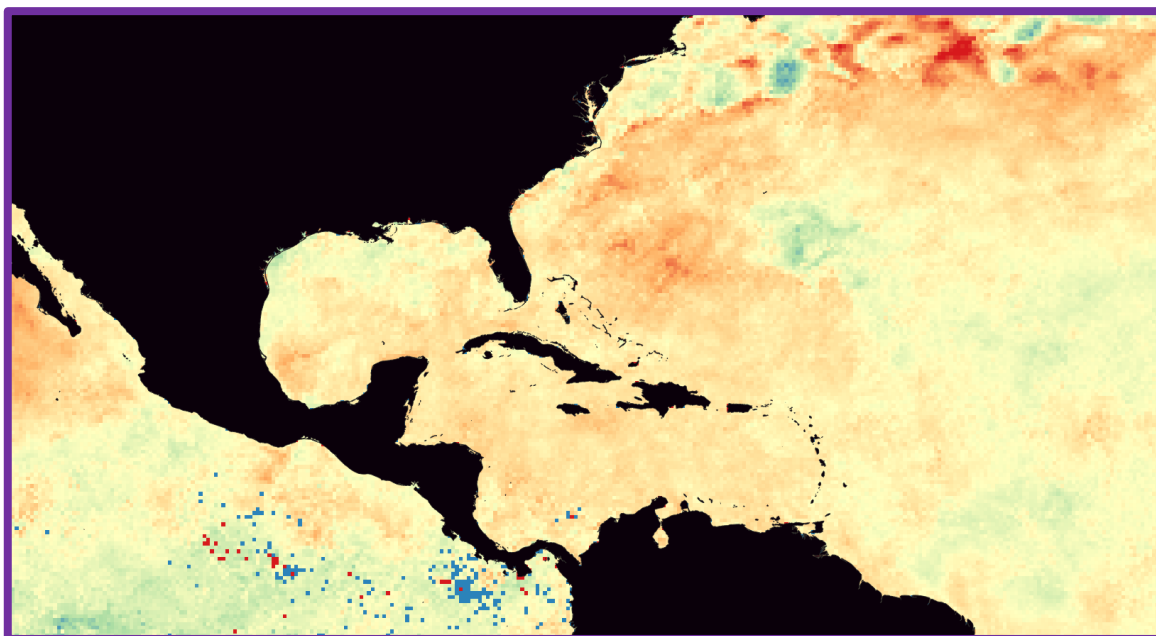
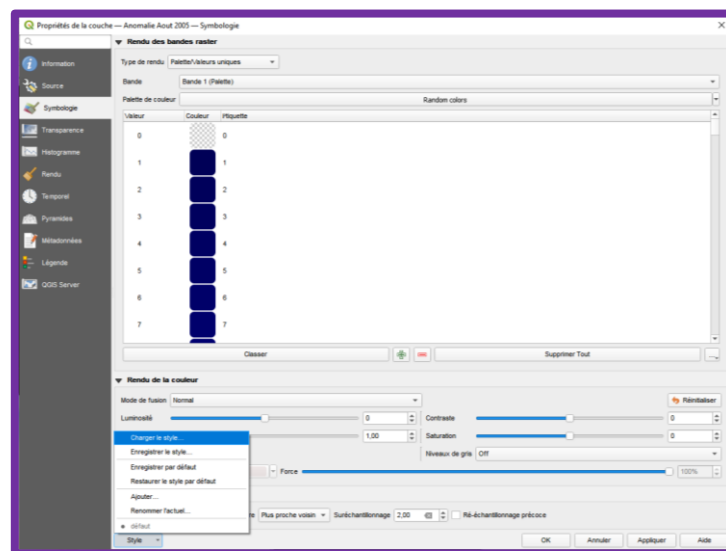
"SST Septembre 2020@1" - "Moyenne 2010s@1"

- Choisir un nom : Anomalie vs 2002-2011 et un répertoire de sortie à l'aide du bouton situé près de la fenêtre Couche de sortie
- Cliquer sur OK

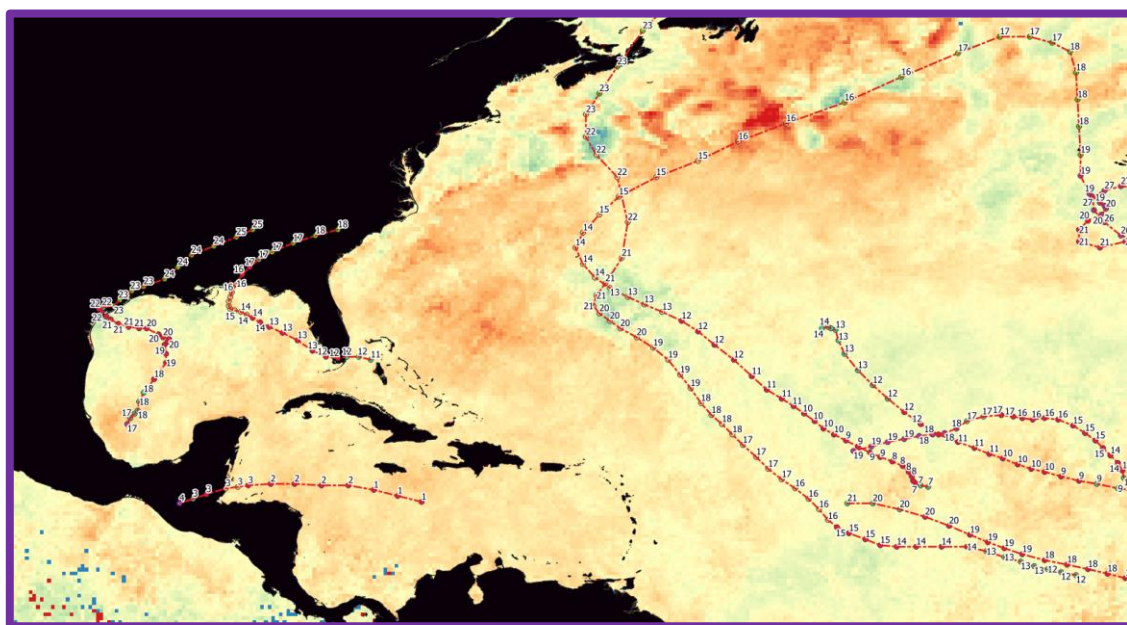
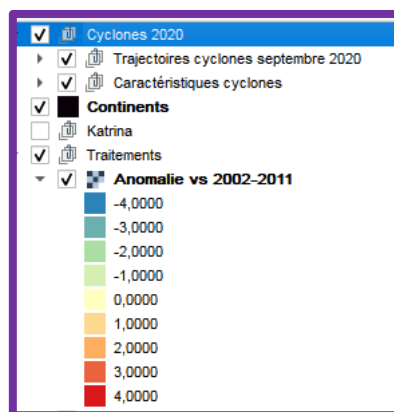




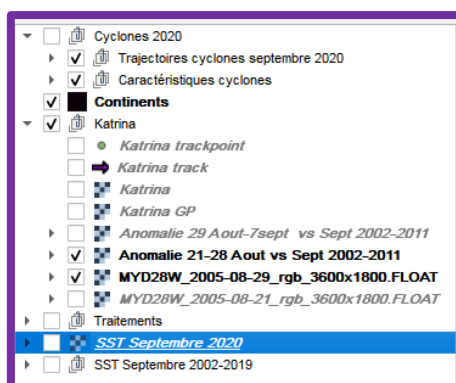
6. Double cliquer sur le nom de ce nouveau fichier, sélectionner l'onglet *Symbologie* puis cliquer sur le bouton *Style* puis *Charger un style*. Sélectionner le fichier *Anomalie SST* de votre dossier de travail



7. Dans la colonne de gauche, utilisez les boutons de visibilité pour rendre visible les couches du groupe Cyclone 2020

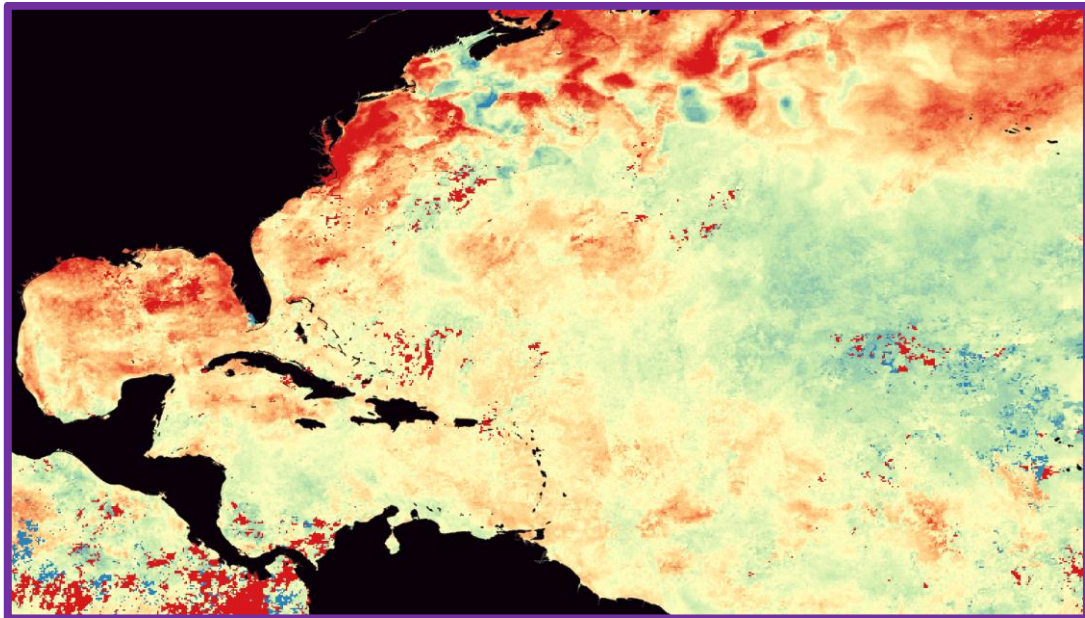


8. Discuter des relations entre température des océans et fréquence des cyclones
9. Dans la colonne de gauche, utilisez les boutons de visibilité pour rendre invisible toutes les couches sauf le groupe d'image Katrina

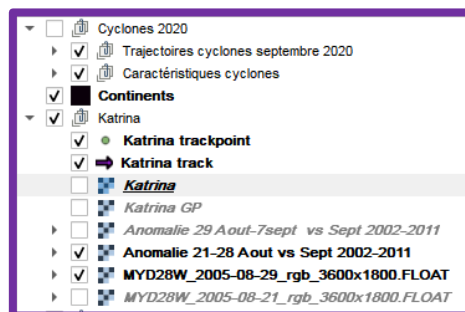


**L'image qui s'affiche correspond aux anomalies de température pour la période 21-28 aout 2005 par rapport à la période 2002-2011**

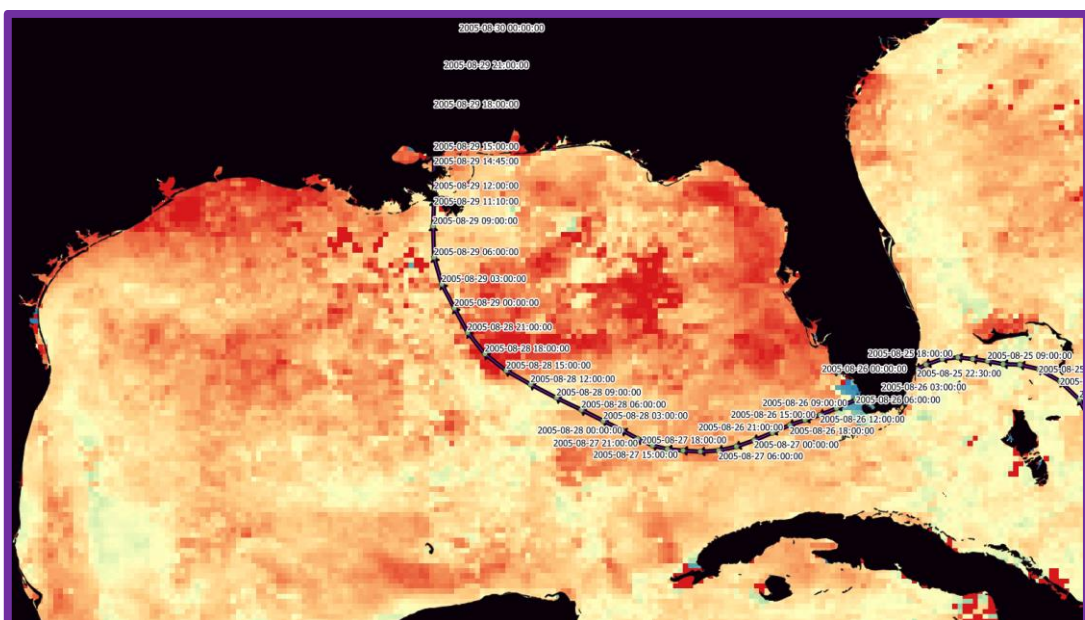
10. Qu'observez-vous au niveau du Golfe du Mexique ?



9. Dans la colonne de gauche, utilisez les boutons de visibilité pour rendre visible les couches Katrina trackpoint et Katrina track

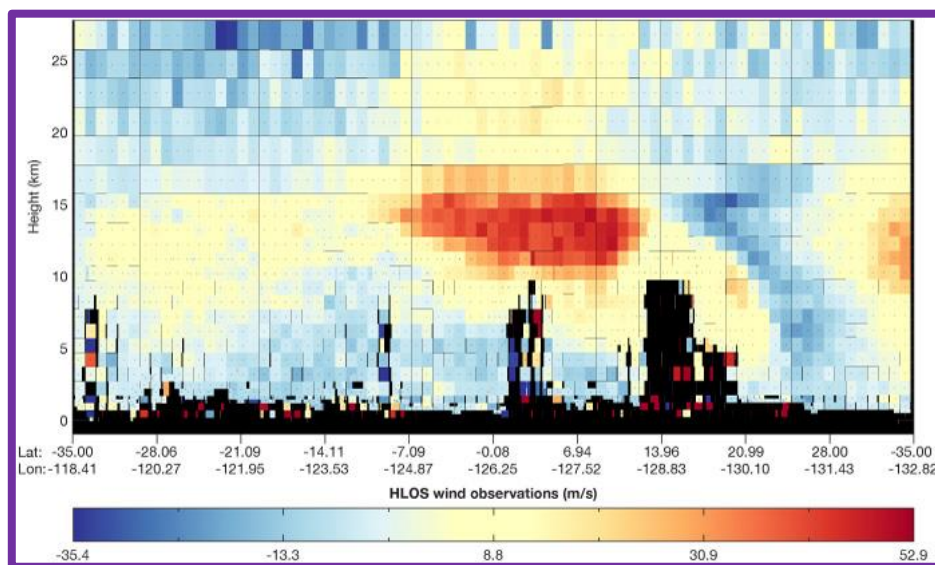


10. Discuter des relations entre température des océans et fréquence des cyclones



### 2.4.3 EVALUER LA VITESSE DU VENT

La vitesse maximale des vents au sein d'un cyclone permet d'appréhender sa puissance. Elle permet surtout d'anticiper les impacts de tels phénomènes. La possibilité de mesurer désormais de profils verticaux de la vitesse des vents permet de s'intéresser au cisaillement des vents et à son déterminisme



L'exploration de la vitesse horizontale des vents permet de s'intéresser à la puissance des cyclones. L'établissement de profils verticaux améliore les modélisations de trajectoire des cyclones. La compréhension des facteurs à l'origine de ces profils comme le cisaillement des vents permettra de progression sur l'évolution future d'un facteur décisif pour la pérennité d'un cyclone.

Il existe très peu de données facilement utilisables sur la vitesse des vents. Même en utilisation documentaire, il y a nécessité d'adapter pour faciliter la compréhension. Par ailleurs les données de vitesses sont difficiles à exploiter statistiquement, quant aux profils verticaux, ils sont intéressants mais difficile à lire et peu nombreux.

### 2.4.4 QUANTIFIER LES PRECIPITATIONS ASSOCIEES

L'observation de la distribution des précipitations et surtout du profil vertical permet d'explorer la structuration du cyclone. La quantification des précipitations est importante car elle permet d'anticiper d'éventuels impacts dans le cas de cyclone atteignant la côte



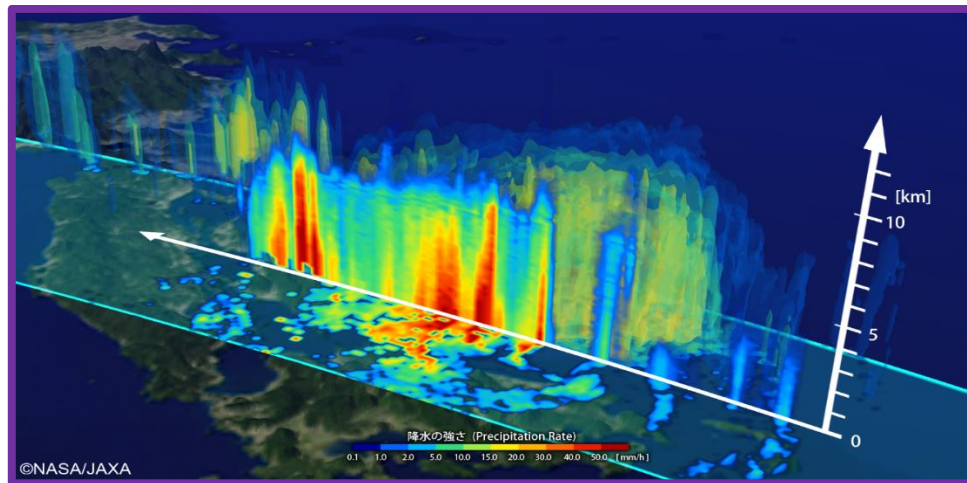


Figure 97 : Taux de précipitation au sein d'un cyclone

Il existe très peu de données facilement utilisables sur les précipitations. Les données sur la structuration très complexes à interpréter surtout les vues de profil. On aura cependant une possibilité d'exploitation documentaire réalisable sans trop d'explications préalables.

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Évolution projetée de la température moyenne à la surface du globe, par rapport à 1850–1900, pour deux périodes avec quatre .....	3
Figure 2 : Fonte des glaciers au Groenland .....	3
Figure 3 : Fonte des glaciers de l'Antarctique .....	4
Figure 4 : Variation de masse antarctique depuis 2002. Source de données : Mesure de la masse de glace par les satellites GRACE de la NASA. L'écart représente le temps entre les missions. ....	4
Figure 5 : Variation de masse du Groenland depuis 2002. Source de données : Mesure de la masse .....	4
Figure 6 : État observé en 2008 et simulations de l'inlandsis groenlandais en l'an 3000. ....	5
Figure 7 : Variation en pourcentage de la perte de masse basale de la plate-forme de glace pour chaque simulation du RCP. ....	5
Figure 8 : Evolution des conditions dans la mer d'Amundsen.....	6
Figure 9 : Causes des changements dans l'épaisseur de l'inlandsis d'ici 2100 .....	6
<b>Figure 10 : Evolution des glaces de mers au niveau de l'Océan Arctique.....</b>	<b>7</b>
Figure 11 : Evolution de l'âge de la glace de mer dans l'Océan Arctique .....	7
Figure 12 : Extension minimales des glaces de mer dans l'Océan Arctique en septembre. Source de données : Observations par satellite. Crédit: NSIDC/NASA .....	7
Figure 13 : Fonte des glaces de mer en Antarctique .....	8
Figure 14 : Pertes au sein de la Cryosphère .....	8
Figure 15 : Evolution du niveau marin depuis 1900 et origine de cette élévation.....	9
Figure 16 : Evolution du niveau de la mer depuis 1993 mesurée par satellite .....	9
Figure 17 : Carte d'élévation du niveau de la mer .....	9
Figure 18 : Contribution des différents acteurs responsables de l'élévation du niveau de la mer.....	10
Figure 19 : Origine des variations géographiques de l'élévation du niveau de la mer .....	10
Figure 20 : Projection de l'élévation du niveau de la mer pour 2100.....	11
Figure 21 : Effet de l'élévation du niveau régional de la mer sur les niveaux marins extrêmes pour différents sites côtiers .....	12
Figure 22 : Les Maldives observés depuis l'Espace .....	13
Figure 23 : Anticyclone et dépressions.....	14
Figure 24 : Anticyclone et climats du monde .....	14
Figure 25 : Exemple d'anticyclones observé depuis l'Espace .....	15
Figure 26 : L'échelle de Beaufort .....	16
Figure 27 : L'échelle de Saffir-Simpson .....	16
Figure 28 : Exemple de Tempête extratropicale.....	16
Figure 29 : Orage et cyclone .....	17
Figure 30 : Profil thermique et massique de l'atmosphère.....	17
Figure 31 : Profil thermique latitudinal .....	18
Figure 32 : Instabilité barocline et alimentation des tempêtes .....	18

Figure 33 : Structure d'un cyclone .....	19
Figure 34 : Formation d'un cyclone.....	19
Figure 35 : Evolution statistique du nombre de tempêtes dans l'Atlantique (1) .....	20
Figure 36 : Evolution statistique du nombre de tempêtes dans l'Atlantique (2) .....	20
Figure 37 : Evolution de la fréquence des cyclones entre 1980 et 2018 .....	21
Figure 38 : L'indice d'oscillation multidécennale de l'Atlantique et le nombre moyen de cyclones tropicaux sur cinq ans .....	21
Figure 39 : Influence typique d'El Niño sur l'activité saisonnière des ouragans dans le Pacifique et l'Atlantique.....	22
Figure 40 : Influence typique d'El Niño sur l'activité saisonnière des ouragans dans le Pacifique et l'Atlantique.....	22
Figure 41 : Le cisaillement du vent.....	22
Figure 42 : Effets du cisaillement vertical sur la cyclogénèse .....	23
Figure 43 : Modification des circulations atmosphériques et épisode El Niño .....	23
Figure 44 : Circulation de Walker durant une période neutre .....	24
Figure 45 : Anomalie de la circulation de Walker (décembre-février) lors des épisodes El Niño, superposée sur la carte des anomalies moyennes de température de surface de la mer .....	24
Figure 46 : Anomalie de la circulation de Walker (décembre-février) lors des épisodes la Niña, superposée sur la carte des anomalies moyennes de température de surface de la mer .....	25
Figure 47 : Modèles climatiques associés à la phase chaude de l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (AMO). .....	25
Figure 48 : Déplacement de la latitude où les cyclones atteignent leur intensité maximale .....	26
Figure 49 : Evolution de la fréquence des cyclones .....	26
Figure 50 : Modélisation de l'évolution des cyclones de catégorie 4 et 5 pour l'Atlantique.....	27
Figure 51 : Résumé des changements régionaux et mondiaux prévus pour les cyclones tropicaux (TC) en supposant un réchauffement planétaire de 2 °C.....	27
Figure 52 : Vulnérabilité des zones côtières et cyclones.....	28
Figure 53 : Activité des cyclones tropicaux de l'Atlantique Nord Selon l'indice de dissipation de puissance, 1949-2015 .....	29
Figure 54 : Deux scénarii pour l'évolution cyclonique en lien avec les changements de température de surface de l'océan Atlantique .....	29
Figure 55 : Projection de l'évolution du cisaillement des vents.....	30
Figure 56 : Evolution des conditions d'intensification des océans au large de la côte Est des USA .....	31
Figure 57 : Statistiques sur la fréquence des cyclones par bassin cyclonique .....	31
Figure 58 : Recensement des événements cycloniques en 2020 pour l'Atlantique (1).....	32
Figure 59 : Recensement des événements cycloniques en 2020 pour l'Atlantique (2).....	32
Figure 60 : Recensement des événements cycloniques en 2020 pour l'Atlantique (3).....	33
Figure 61 : Nombre de cyclones, de cyclones majeurs et énergie cumulative des cyclone (ACE) dans l'Atlantique entre 1980 et 2020.....	33
Figure 62 : Statistiques cycloniques en Atlantique .....	34
Figure 63 : Index ENSO .....	34
Figure 64 : Principe de l'altimétrie spatiale.....	35

Figure 65 : Altimétrie radar du satellite Cryosat-2 .....	36
Figure 66 : Altimétrie laser du satellite Icesat-2 .....	36
Figure 67 : Le champ gravitationnel de la Terre (avec exagération verticale), également connu sous le nom de « pomme de terre gravitationnel de Potsdam » .....	36
Figure 68 : Comment GRACE mesure la gravité.....	37
Figure 69 : Mesure des changements du niveau de glace en Antarctique entre 2003 et 2018 .....	37
Figure 70 : Calcul du NDSI.....	38
Figure 71 : Couverture neigeuse Avril 2021 .....	39
Figure 72 : La constellation de satellite mesurant la SST .....	39
Figure 73 : Détermination de la température par mesure dans l'IR.....	40
Figure 74 : utilisation des micro-ondes pour étudier les océans.....	40
Figure 75 : Mesure de la SST par IR (8-15 novembre 2016. Capteur MODIS).....	40
Figure 76 : Mesure de la SST par micro-ondes (8-15 novembre 2016. capteur TMI, AMSR-E, AMSR2, and WindSat) .....	41
Figure 77 : L'intensification rapide du vent de l'ouragan Harvey vue par le capteur SMAP de la NASA .....	42
Figure 78 : Principe du diffusiomètre Ascet .....	42
Figure 79 : Mesure de la vitesse des vents au sein du Cyclone Michael le 9 octobre 2018 .....	43
Figure 80 : Cyclone Sandy observé par le diffusiomètre OSCAT .....	43
Figure 81 : Le satellite Aeolus .....	43
Figure 82 : Principe de fonctionnement du LIDAR d'Aeolus .....	44
Figure 83 : Premières données sur le vent du satellite Aeolus de l'ESA .....	45
Figure 84 : Exemple de profil atmosphérique de la vitesse des vents (6 mai 2020) au-dessus de l'Europe .....	45
Figure 85 : Vent mesuré par le satellite Aeolus lors de la traversée du cyclone Idai à l'ouest de Madagascar le 11 mars 2019.....	45
Figure 86 : Structure du support de la modélisation .....	72
Figure 87 : Premiers résultats .....	72
Figure 88 : Générer une rotation .....	72
Figure 89 : Naissance d'un "cyclone" .....	73
Figure 90 : Pression, vents, précipitations et cyclones .....	74
Figure 91 : Mise en place de la rotation de l'air au sein du cyclone.....	74
Figure 92 : la naissance et le cycle de vie du cyclone Ana (2021).....	97
Figure 93 : Suivre un cyclone .....	97
Figure 94 : Structure d'un cyclone observé en imagerie IR.....	98
Figure 95 : Température de surface de l'Atlantique pendant la saison cyclonique 2020 .....	114
Figure 96 : Profil vertical de la structuration des vents à partir du satellite Aeolus .....	121
Figure 97 : Taux de précipitation au sein d'un cyclone .....	122