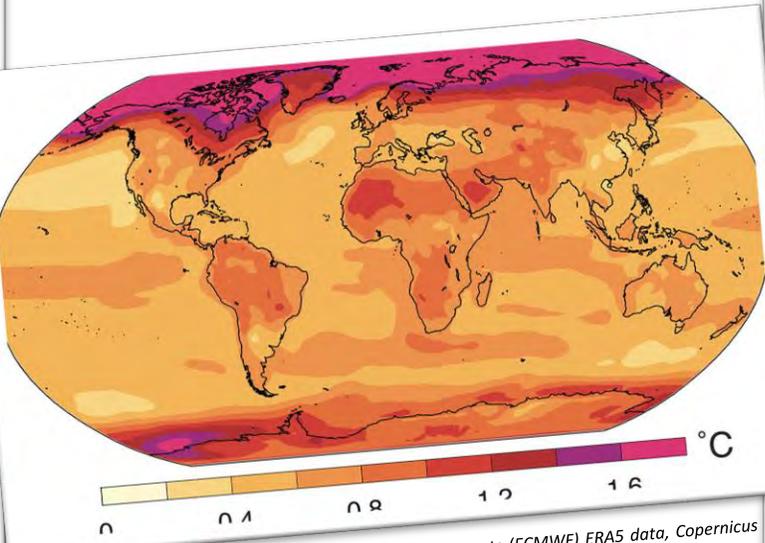




Expliquer le changement climatique à partir des données spatiales



© European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) ERA5 data, Copernicus Climate Change Service



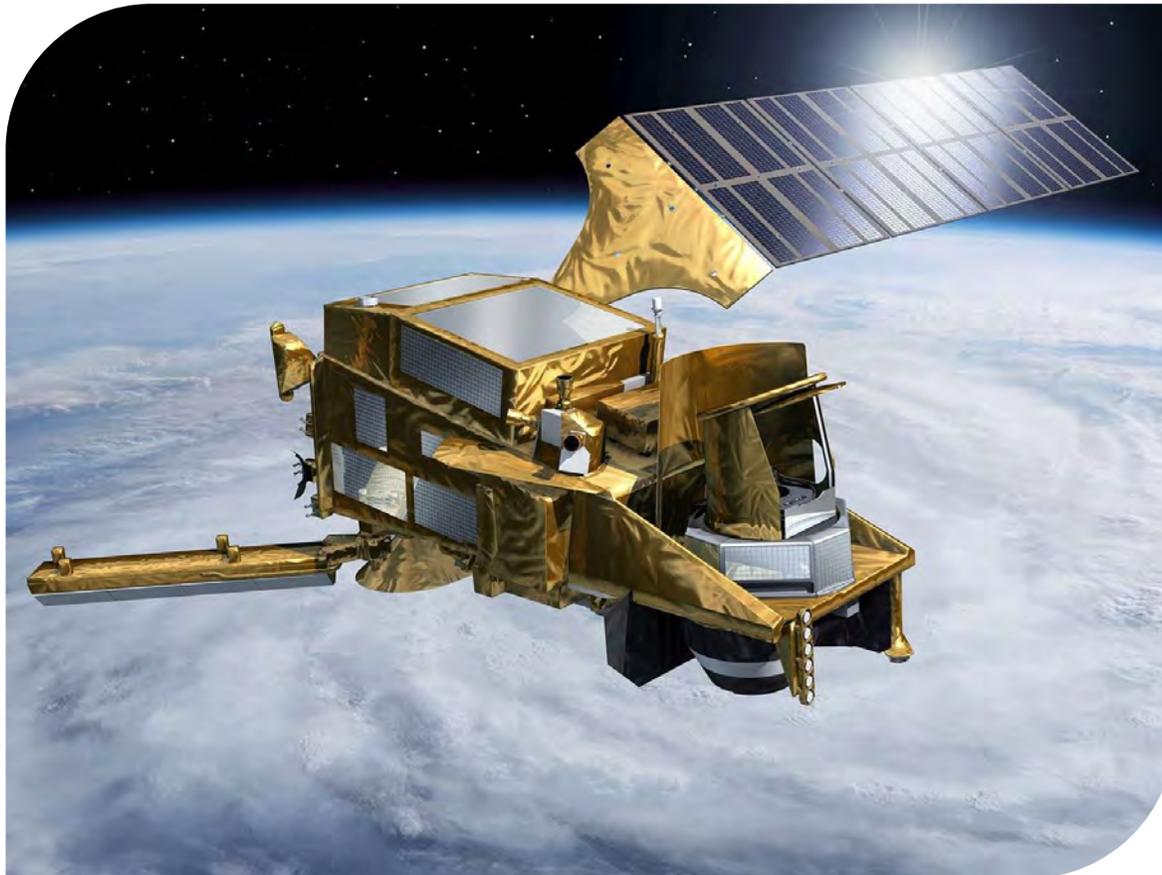
© ESA

© Buffalo News editorial cartoon by Pulitzer-Prize Winner Adam Zyglis

Sabrina Ben Brahim - Yves Darbarie - Natacha Mazon



Observer et expliquer le changement climatique à partir des données spatiales



Sabrina Ben Brahim – Yves Darbarie – Natacha Mazon



Observer et expliquer le changement climatique à partir des données spatiales

- L'année 2020 a constitué l'année la plus chaude aussi bien dans le Monde (avec 2016) qu'en France depuis le début des mesures météorologiques. Signe supplémentaire du changement climatique ?
- L'exploration des données spatiales constitue un medium préférentiel pour appréhender les causalités et les conséquences du changement climatique.
- L'objectif de cet atelier co-disciplinaire est d'explorer et de s'approprier l'utilisation de données spatiales pour aborder la thématique du changement climatique avec les élèves.



Observer et expliquer le changement climatique à partir des données spatiales

- A travers ces différentes voies exploratoires, nous aurons également l'occasion d'expliciter la démarche de construction des connaissances scientifiques et de proposer des pistes d'activités pédagogiques visant à développer l'esprit critique des élèves.
- L'atelier sera structuré suivant 3 axes qui révèlent la réalité du changement climatique et son origine :
 - Partie 1 : Comprendre le bilan thermique (radiatif) de la terre grâce aux données spatiales
 - Partie 2 : Observer et expliquer le changement climatique depuis l'espace
 - Partie 3 : Quelques symptômes du changement climatique



Expliquer le changement climatique à partir des données spatiales

On privilégiera dans cet atelier « allégé » la démarche.

On cherchera à partir d'expériences simple à faire émerger une idée ou une problématique scientifique en lien avec la problématique du changement climatique

On poursuivra en montrant l'apport du domaine spatial dans cette contribution scientifique et dans la possibilité de répondre à la problématique scientifique, tout en intégrant une dimension d'esprit critique sur différents plans.

- Activité 1 : La montée du niveau des eaux (cycle 4)
- Activité 2 : Cyclones et réchauffement climatique (lycée)

Activités collège

Changement climatique et Esprit critique



Plan de la présentation

1. **Proposition d'une séquence** autour du réchauffement climatique à travers le prisme de l'esprit critique (cycle 4)
2. **Regards croisés** : apports du spatial et de l'esprit critique pour traiter spécifiquement la thématique de la montée du niveau des eaux

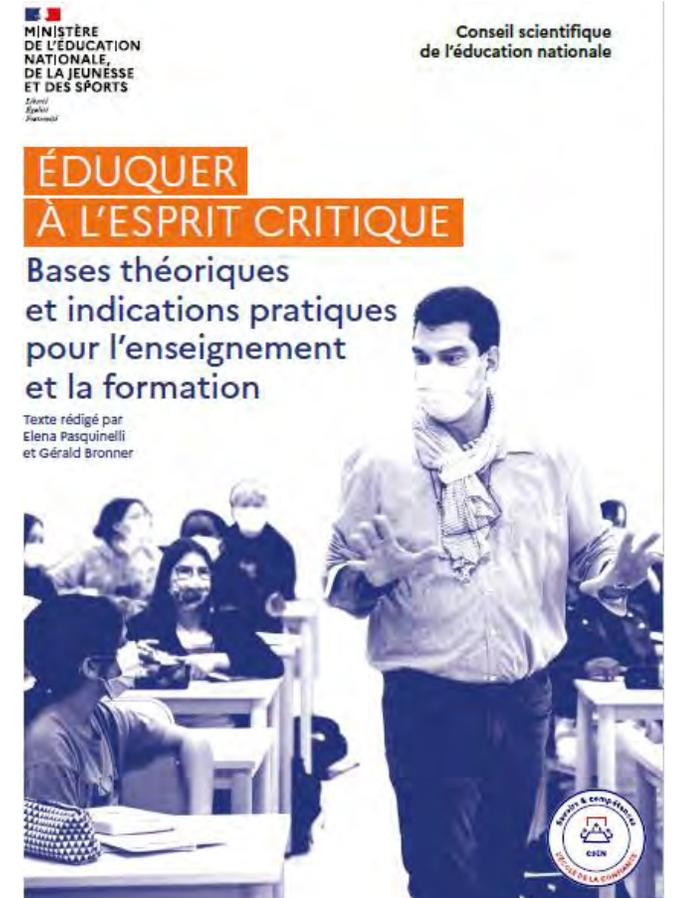


1- Proposition d'une séquence / progression autour du réchauffement climatique à travers le prisme de l'esprit critique

Qu'est-ce que l'esprit critique ?

« Exercer son esprit critique, ce n'est pas tout critiquer mais savoir accorder sa confiance à bon escient »

Source : Rapport du CSEN (2021)



Former des citoyens responsables et engagés

- ⇒ 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

Des 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

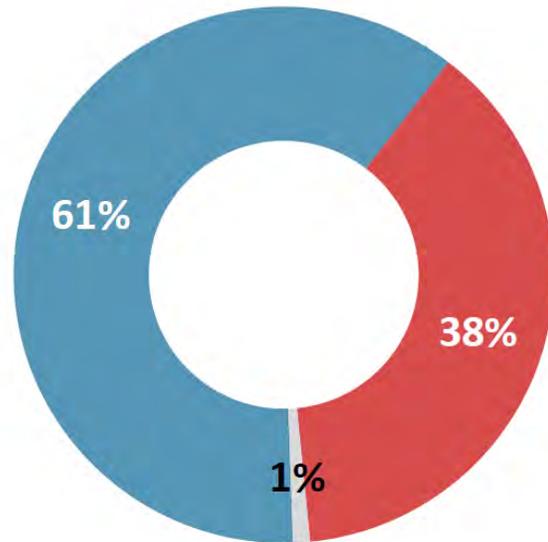
Le changement climatique : un levier pour développer l'esprit critique

On parle de l'augmentation de l'effet de serre qui entraînerait un réchauffement de l'atmosphère de la Terre.

A votre avis, est-ce plutôt ...



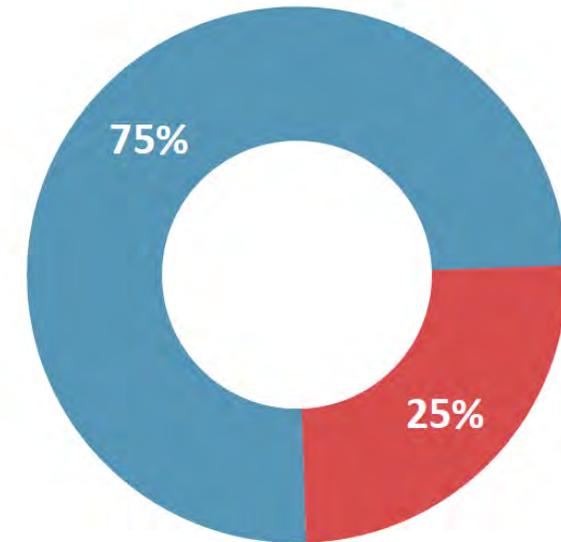
Ensemble des Français
1570 répondants



-  ... une certitude pour la plupart des scientifiques
-  ...une hypothèse sur laquelle les scientifiques ne sont pas tous d'accord
-  NSP

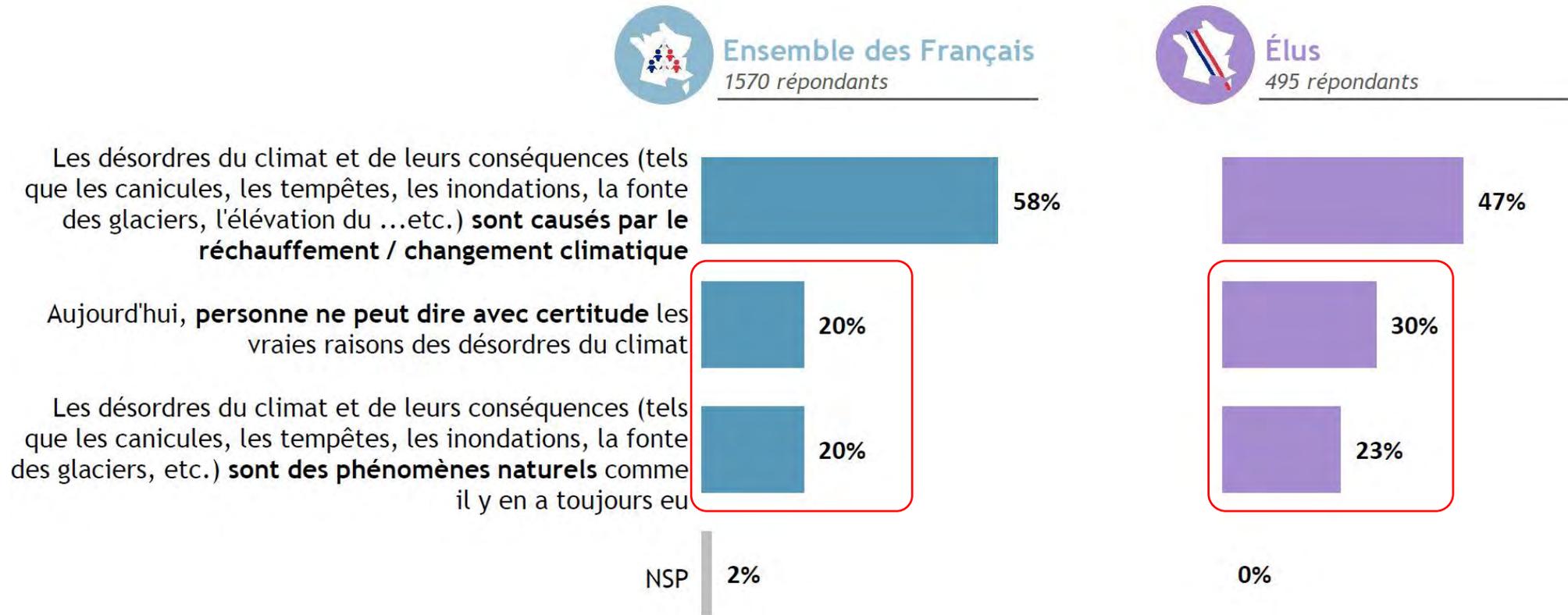


Élus
495 répondants



Source : Sondage Opinionway pour l'ADEME, Octobre 2019

De ces 3 opinions, laquelle se rapproche le plus de la votre ?



Source : Sondage Opinionway pour l'ADEME, Octobre 2019

Proposition d'une séquence cycle 4

Partir de supports quotidiens sur les climatosceptiques : tweet de Trump, extrait de journaux TV sur les COP...

Par exemple : Vidéo qui explique ce que sont les « climatosceptiques »

Voici une capture d'écran de cette vidéo, sur laquelle on peut s'appuyer avec les élèves pour construire une séquence / EPI

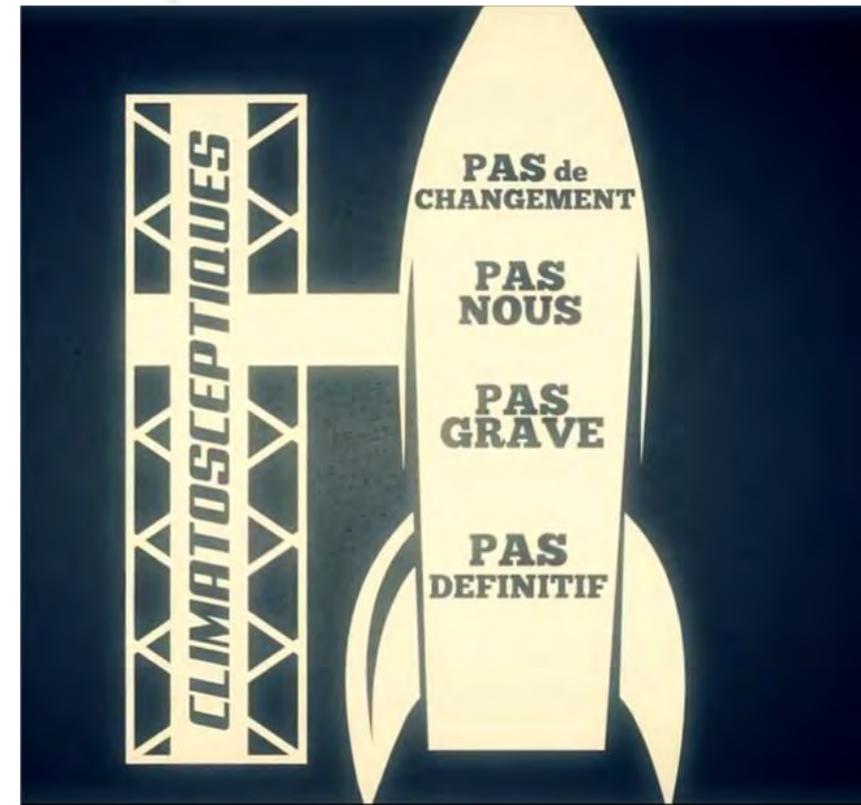
<https://www.youtube.com/watch?v=yKpPXGb1-w0>



Donald J. Trump
@realDonaldTrump

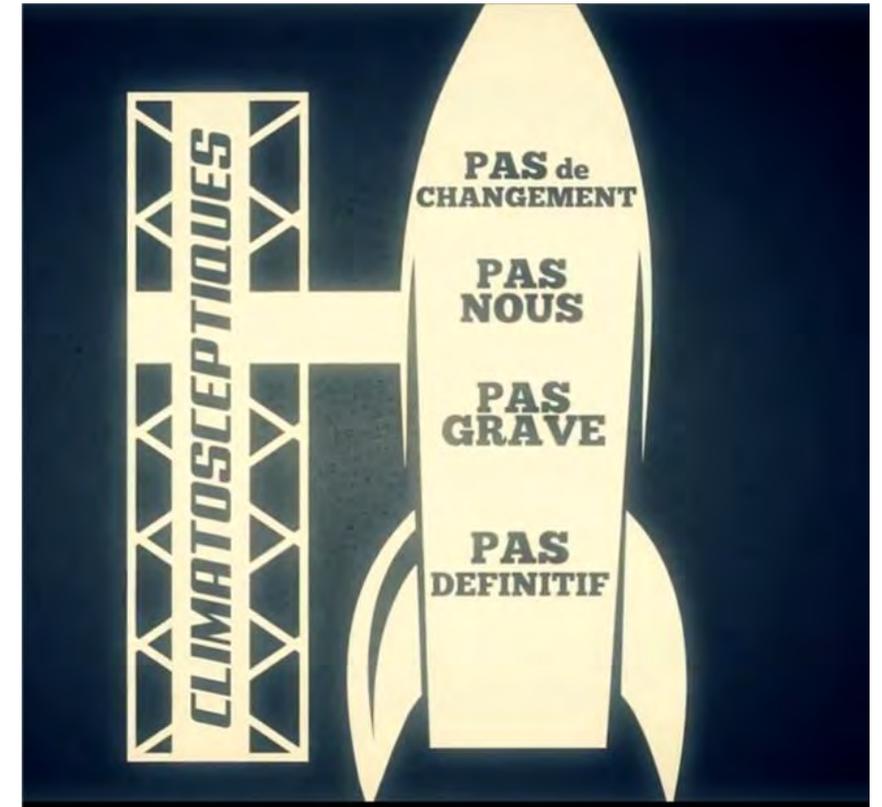


The concept of global warming was created by and for the Chinese in order to make U.S. manufacturing non-competitive.



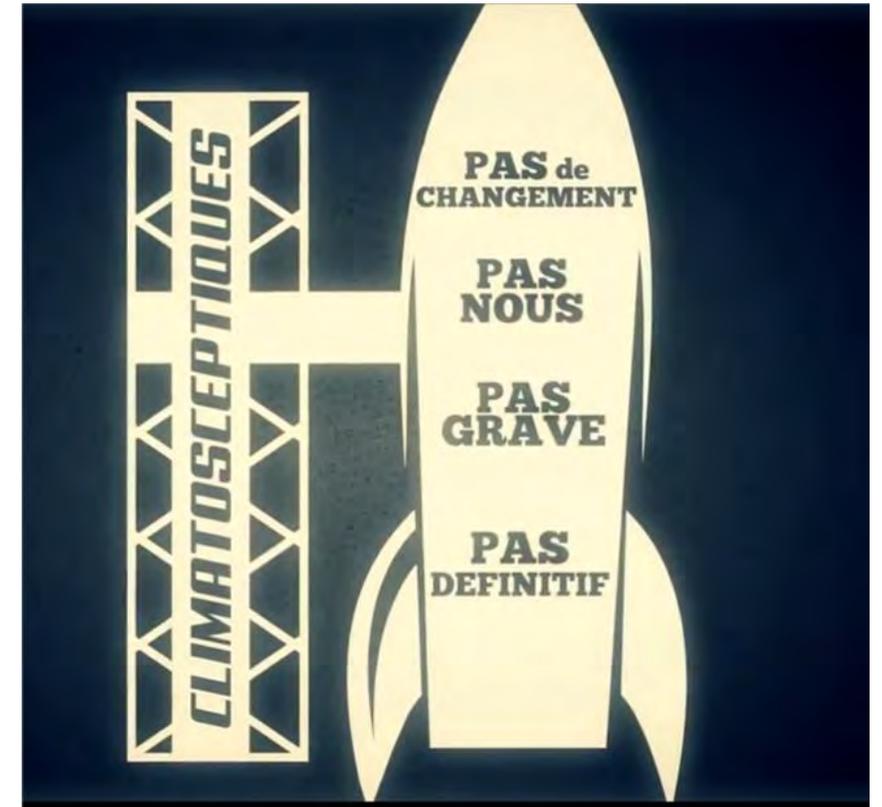
Proposition d'une séquence cycle 4

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



Proposition d'une séquence cycle 4

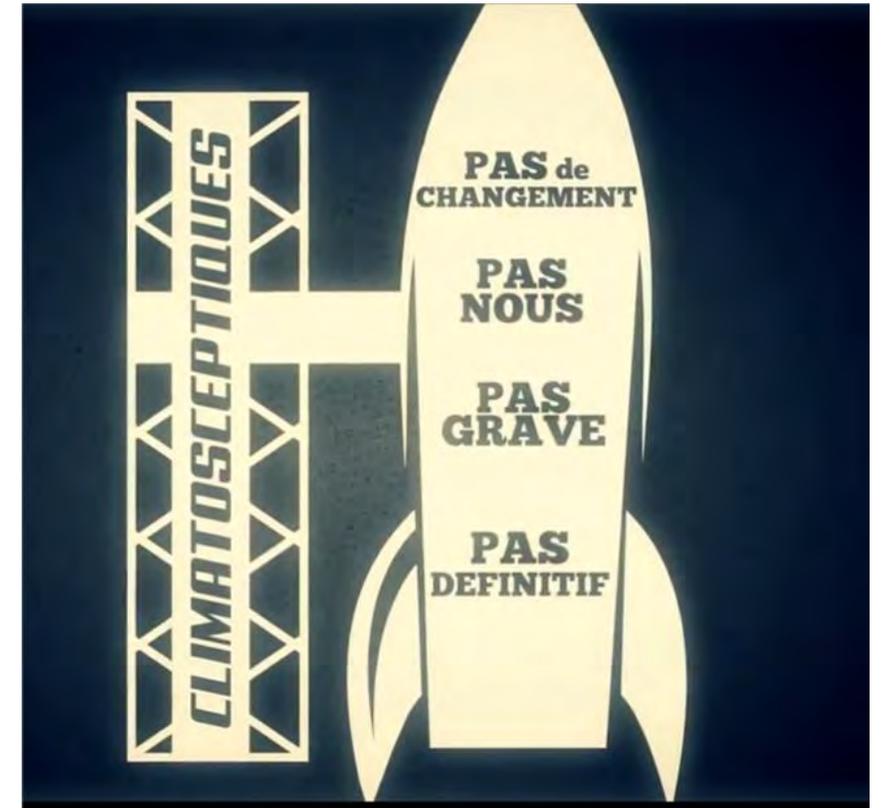
1. Le réchauffement climatique est observable et mesurable
2. L'impact de l'activité humaine dans ce réchauffement climatique
3. Les conséquences observables du réchauffement climatique
4. Un phénomène irréversible



Proposition d'une séquence cycle 4

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

La montée des eaux



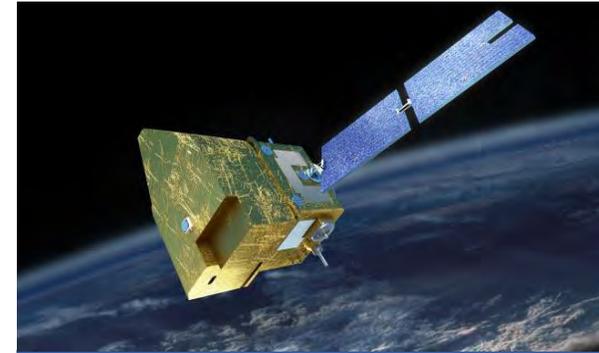


2- Regards croisés : Spatial et esprit critique

Les conséquences observables du réchauffement climatique

« L'avenir de notre Terre passe par l'espace »

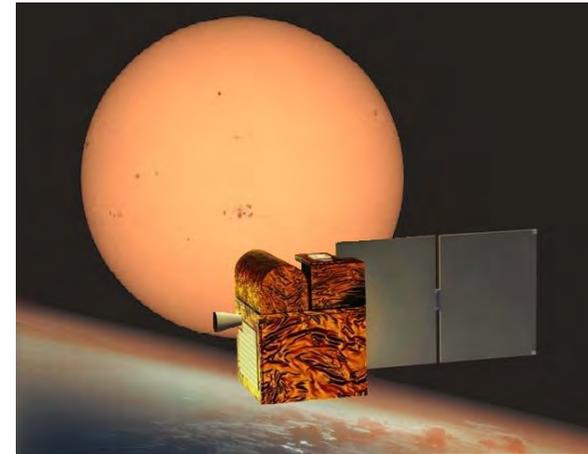
cnes



Microcarb
2021



Merlin
2022



Picard
15 juin 2010



Swot
2022



Vidéo « Le monde » sur les 4 conséquences du réchauffement climatique

- L'augmentation de la température
- La montée des eaux
- L'augmentation de la sécheresse
- L'acidification des océans.



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

Mais attention : les chiffres énoncés sont partiels et proposent de nombreux biais qui seront les piliers de l'argumentation des climatosceptiques.

L'apport du spatial : « la montée des eaux est de 3,3 mm/an »

L'apport du spatial : « la montée des eaux est de 3,3 mm/an »

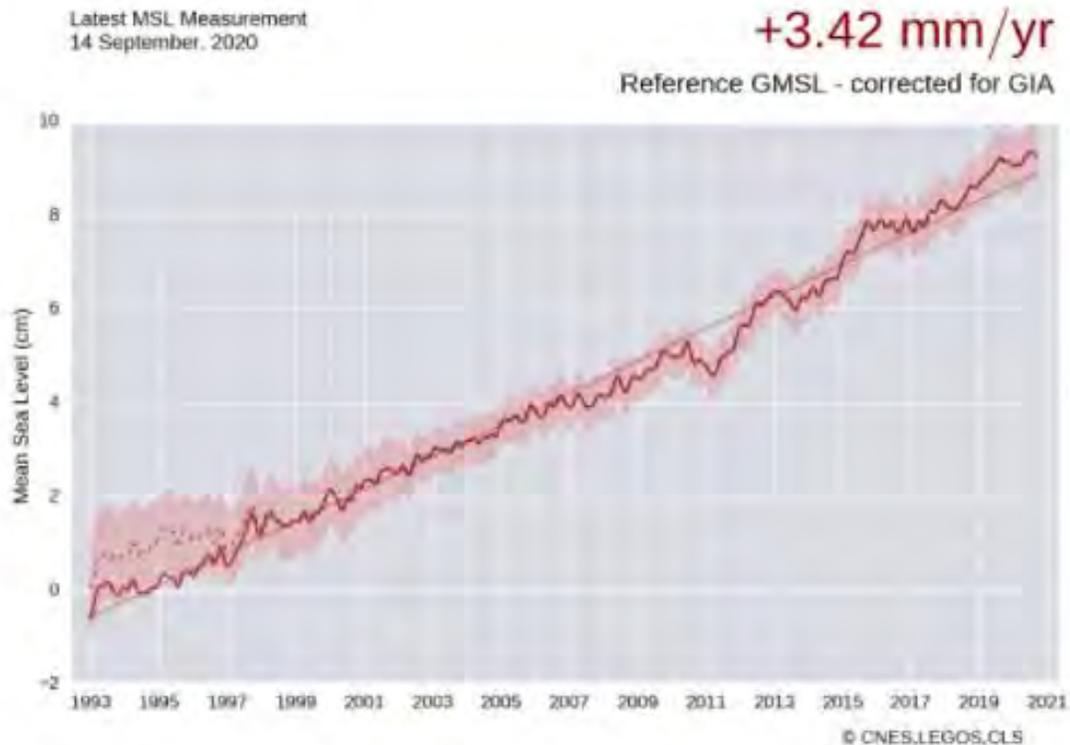
OUI

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



Données LEGOS

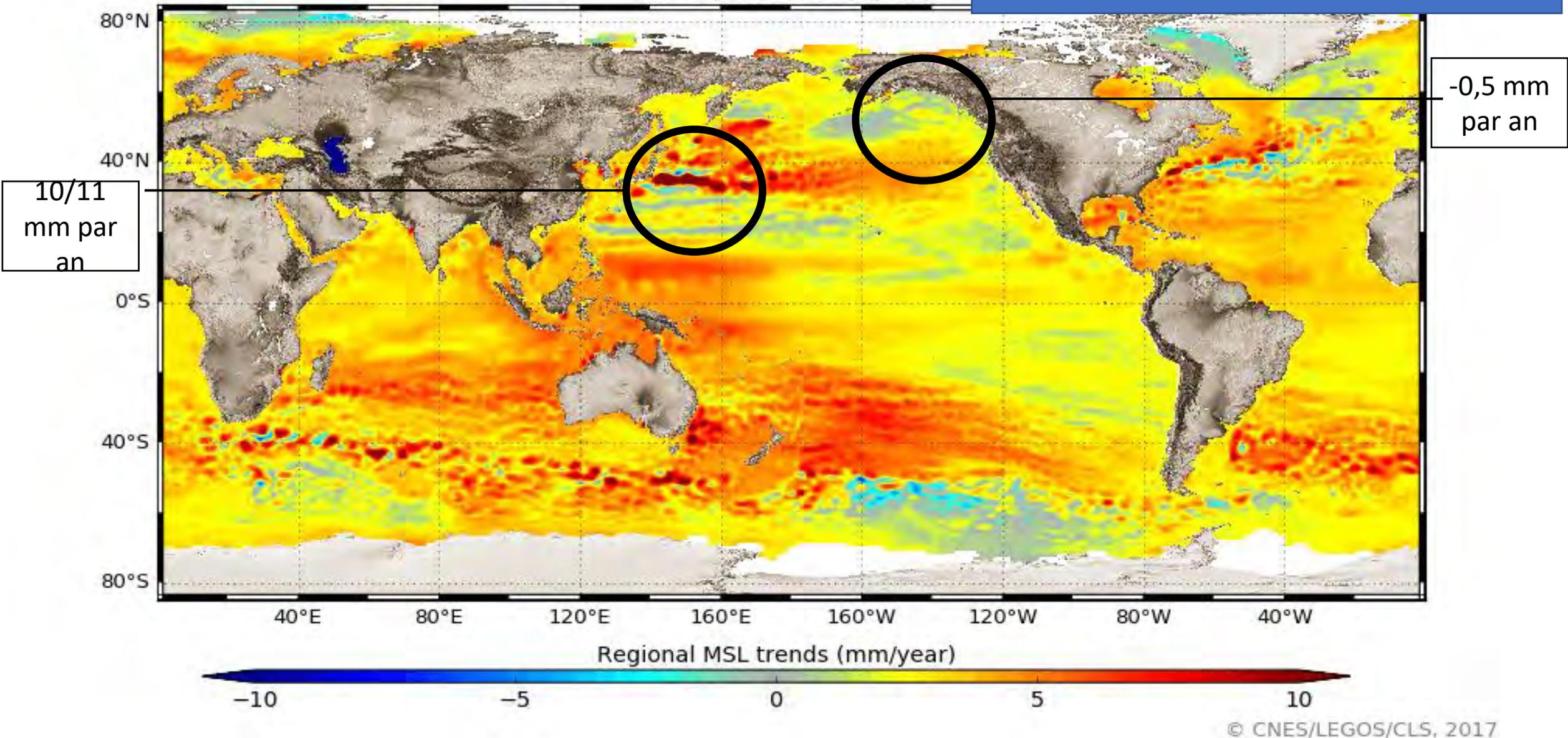
[Vidéo ressource du CNES :](#)
Benoît Meyssignac, présente les recherches, les études permettant l'analyse et la compréhension de la hausse du niveau des océans.



Hausse du niveau de la mer en cm mesurée depuis 1993 par les satellites TOPEX, Jason 1,2,3 et Sentinelle 6 et corrigée du rebond post-glaciaire. La courbe indique la meilleure estimation et la zone ombrée indique l'incertitude à un niveau de confiance de 90%. ©CNES, CLS, LEGOS.

Mais attention, il faut nuancer le discours

Period: Jan-1993 to May-2017



Marégraphes

OPTIONS

176 TRENDS DISPLAYED



CREDITS

PSMSL



SONEL

5000 km

-299.3203, 63.7359



NON

Altimetry-derived global mean sea level (1993-2011)

Elévation du niveau de la mer 1993-2011 par altimétrie Satellitaire

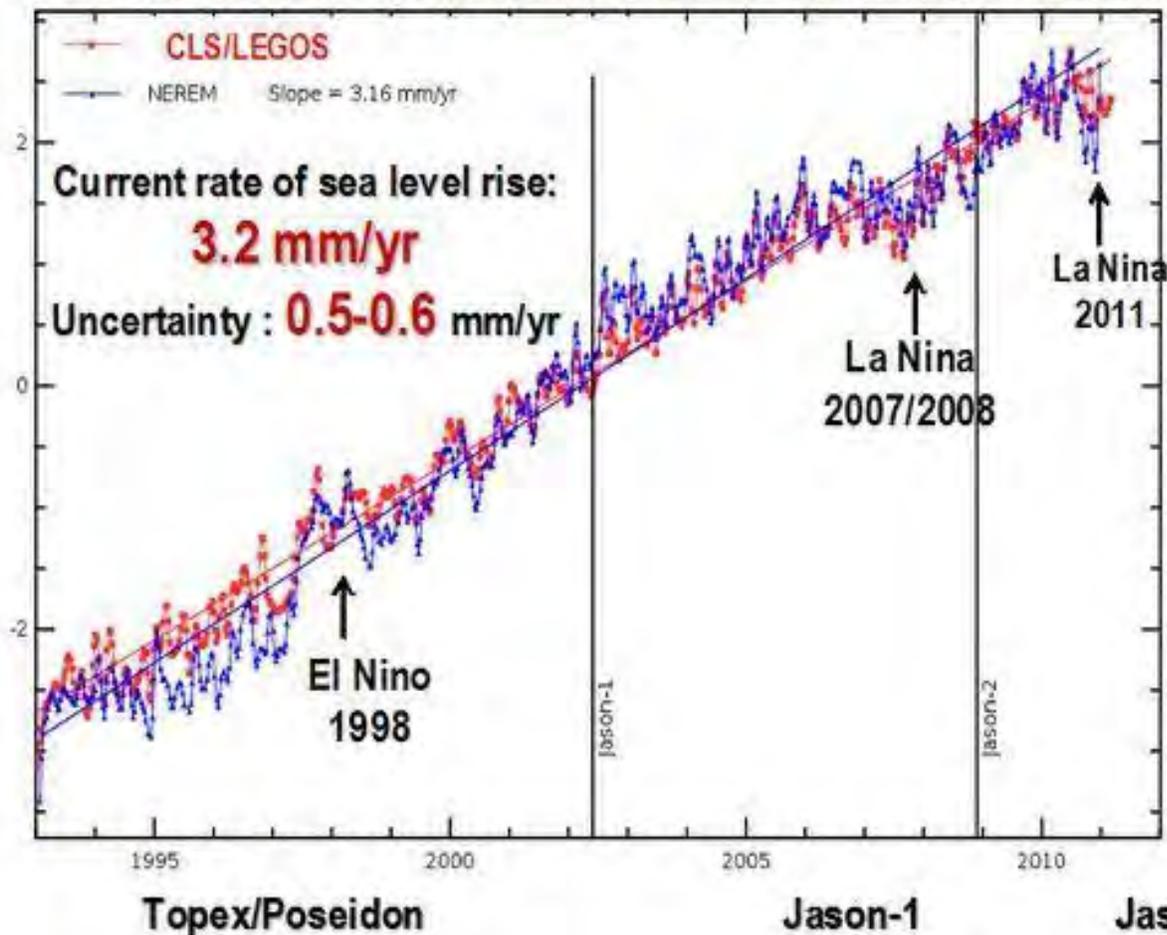


Figure 4

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

NON

Depuis 1993 (donc depuis l'exploitation satellitale), 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^e siècle qui est apparue vers la fin des années 80.



>> *Period selected* : 1900 -> 2018
>> *Area selected* : **Whole earth.**

On peut télécharger les données

Une accélération sur les 20 dernières années.
L'apport des marégraphes

1880

1910

1940

1970

2000

2030

25 cm

20

15

10

5

0 cm

+1,7 mm/an

+3,2 mm/an

Accélération

Élévation du niveau des mers (1880-2014)



Activité mosaïque sur la montée du niveau des eaux (cycle 4)

Activité mosaïque sur la montée du niveau des eaux (cycle 4)

Phase d'introduction :

On peut amener les élèves à s'interroger :

« Quels sont les facteurs qui ont une influence sur le niveau des eaux ? »

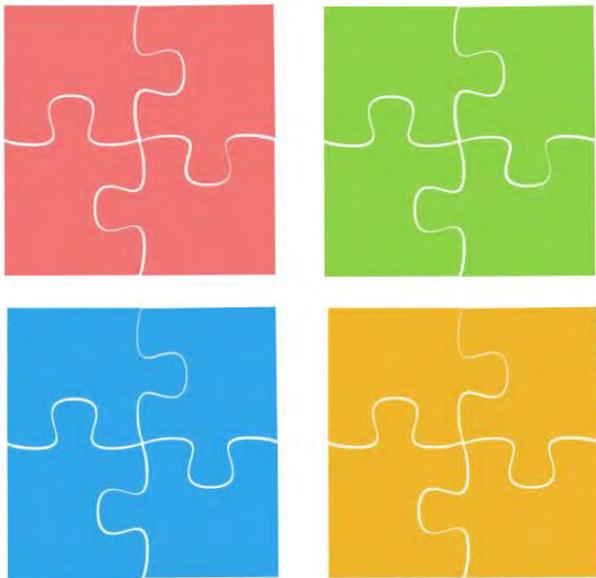
- 1) Formulation d'une hypothèse individuelle.
- 2) Constitution de différents groupes constitués en fonction des hypothèses.

Activité mosaïque sur la montée du niveau des eaux (cycle 4)

Activité sous forme de TP mosaïque (classe puzzle)

Temps 1 – Groupe d'experts :

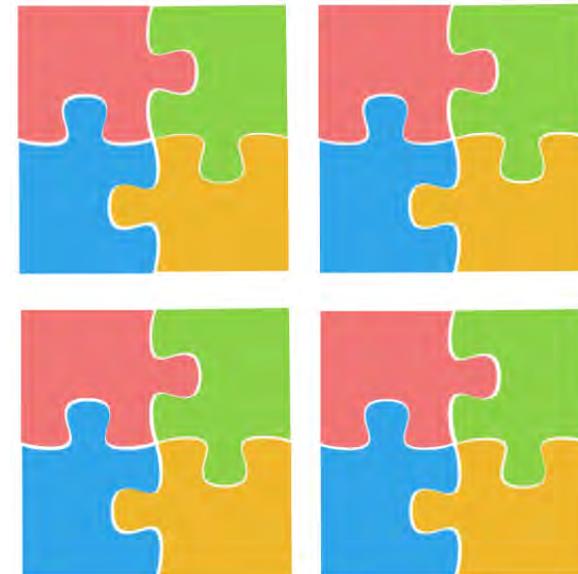
1 expérience pour chaque hypothèse.



Temps 2 – Mosaïque (groupes d'apprentissage)

Constitution de nouveaux groupes : chaque hypothèse est représentée.

=> Mutualiser les observations et faire du lien entre les résultats.



« 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 CO₂ 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 »

« 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 CO₂ 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 »

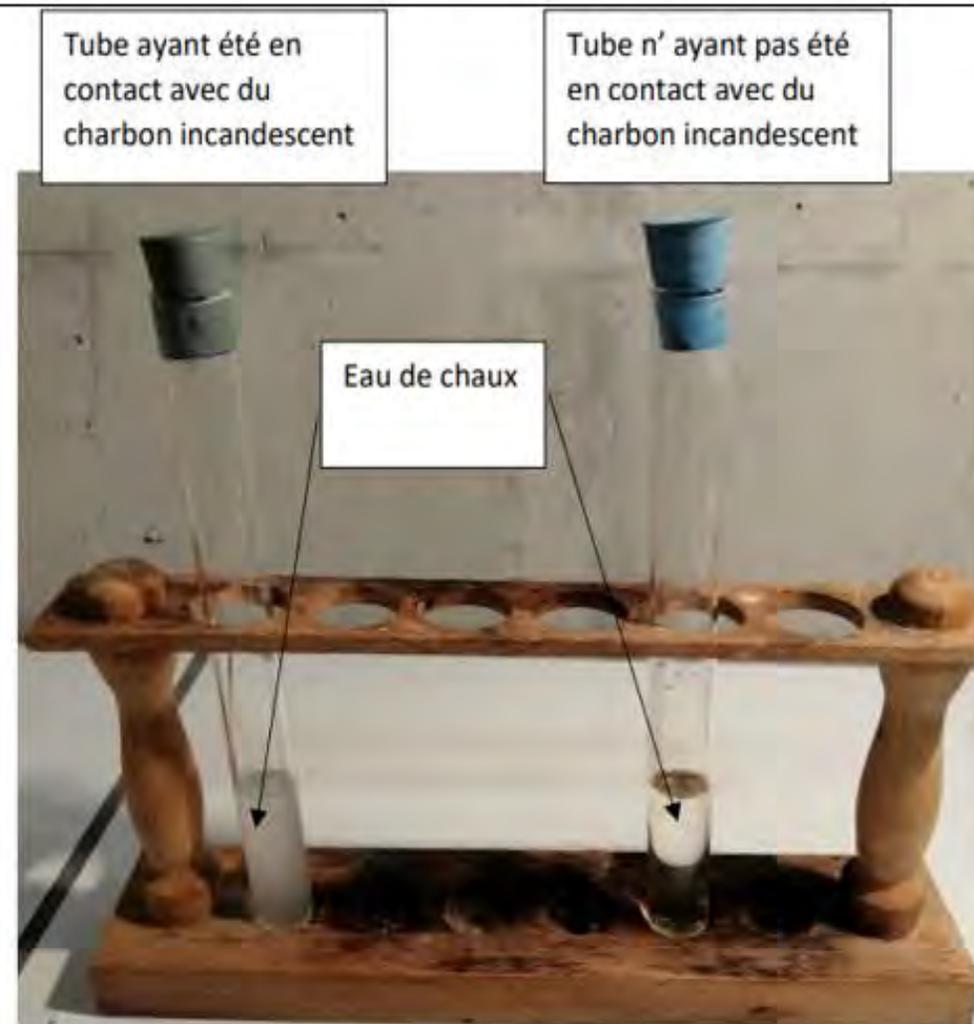
Début de la modélisation

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_2 .



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

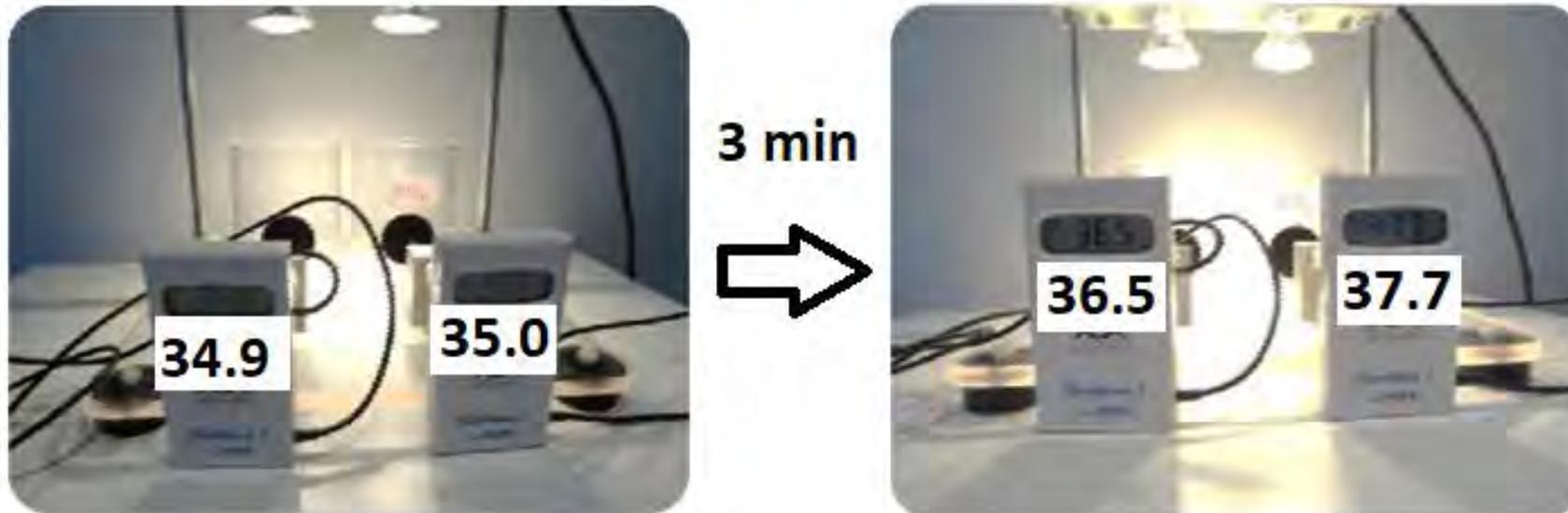
« Il existe un lien entre la quantité de CO₂ libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

« 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 »

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 CO_2



Après 3 min, la température de l'air est plus élevée dans le bécher dont l'air est enrichi en CO_2

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

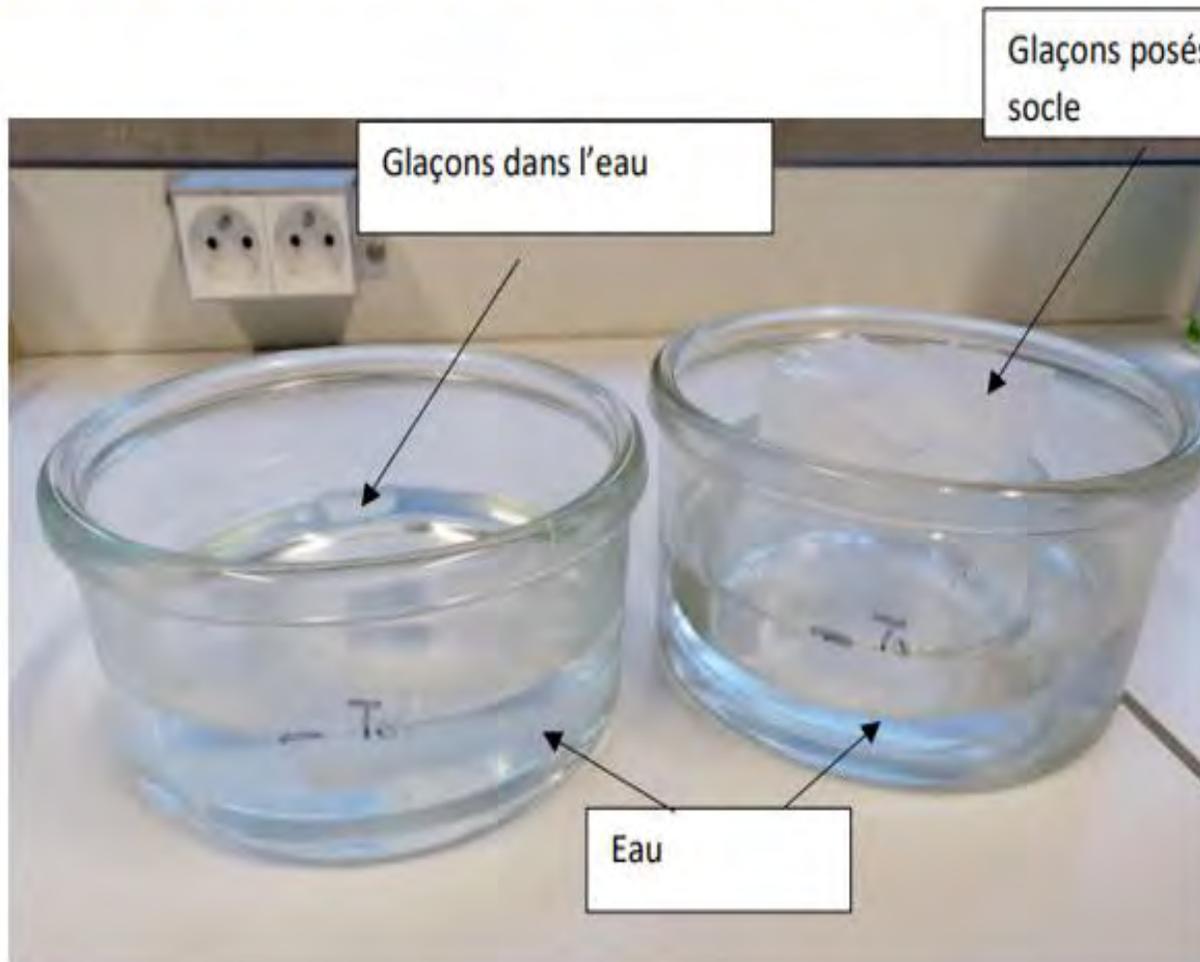
« Il existe un lien entre la quantité de CO₂ libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

« 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 »

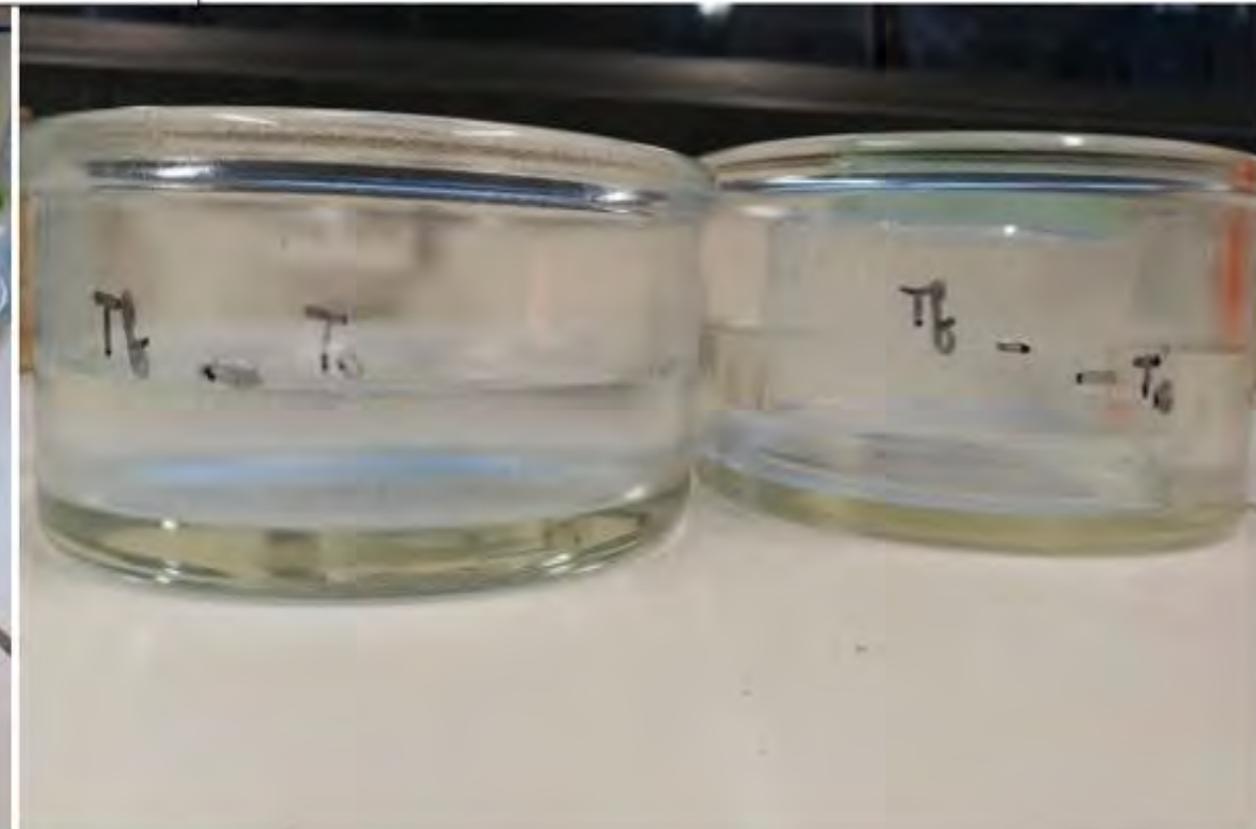
« Il existe un lien entre l'élévation de la température des océans et la montée du niveau des eaux »

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 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 CO₂ 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 »

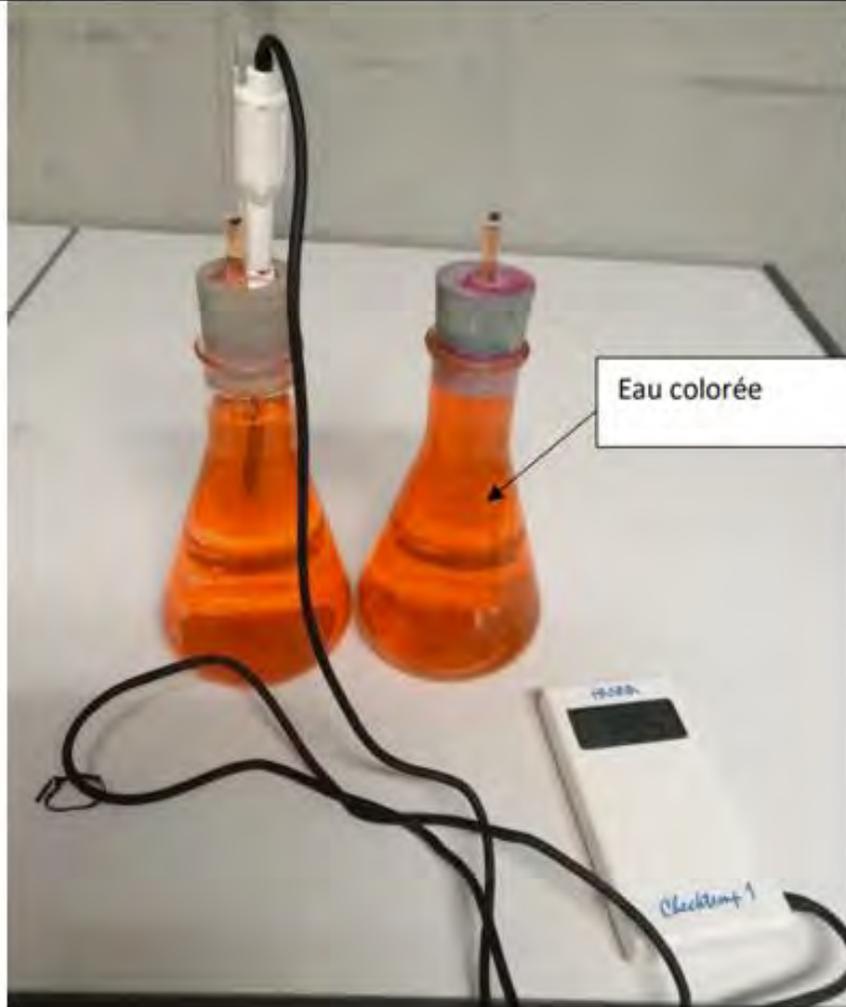
« Il existe un lien entre la variation de l'albedo et la montée du niveau des eaux »

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

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



« 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 CO₂ 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 »

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

Début de la modélisation

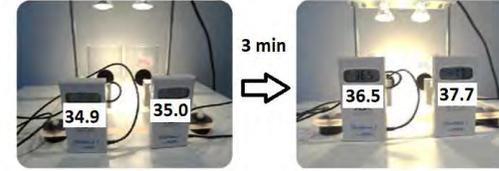


Résultats au bout de 15 min





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 CO₂



Après 3 min, la température de l'air est plus élevée dans le bécher dont l'air est enrichi en CO₂



Diminution de l'albédo



Fonte glaciers continentaux

Fonte des « glaces »

Augmentation du niveau marin



Dilatation de l'eau



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.

« 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 CO₂ libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

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

La montée des
eaux

« Il existe un lien entre la fonte des glaces 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 »

« 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 CO₂ libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

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

La montée des
eaux

« Il existe un lien entre la fonte des glaces 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 »

L'apport du spatial : « La combustion de ressources d'énergie fossiles libère du CO₂ dans l'atmosphère ».

OCO 2 (2014) et **OCO 3** (mai 2019) :

Spectromètres embarqués qui mesurent la luminance pour certains canaux IR caractéristiques de l'absorption du CO₂

Microcarb (2021) :

Objectif :

Suivi et caractérisation des flux de CO₂ 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)

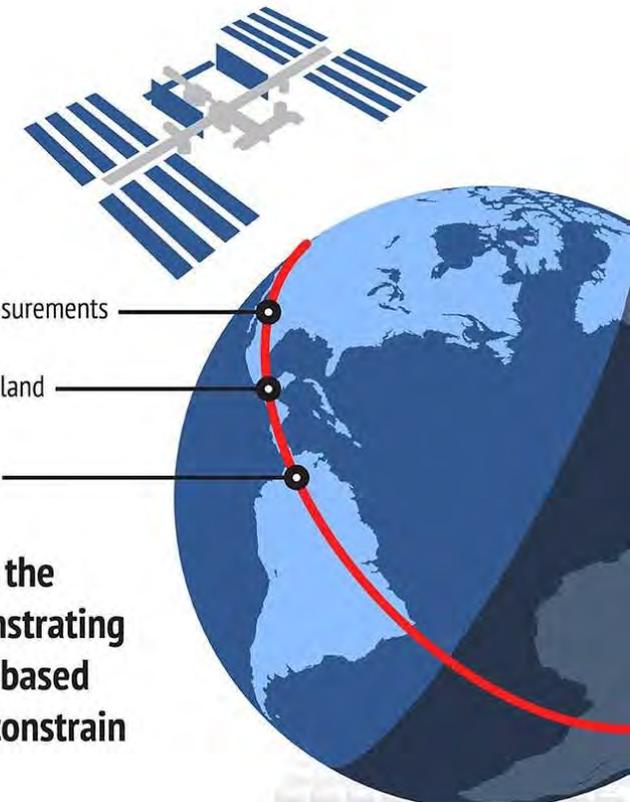
How OCO-3 Will Help

Make continued global measurements

See daily CO₂ changes over land

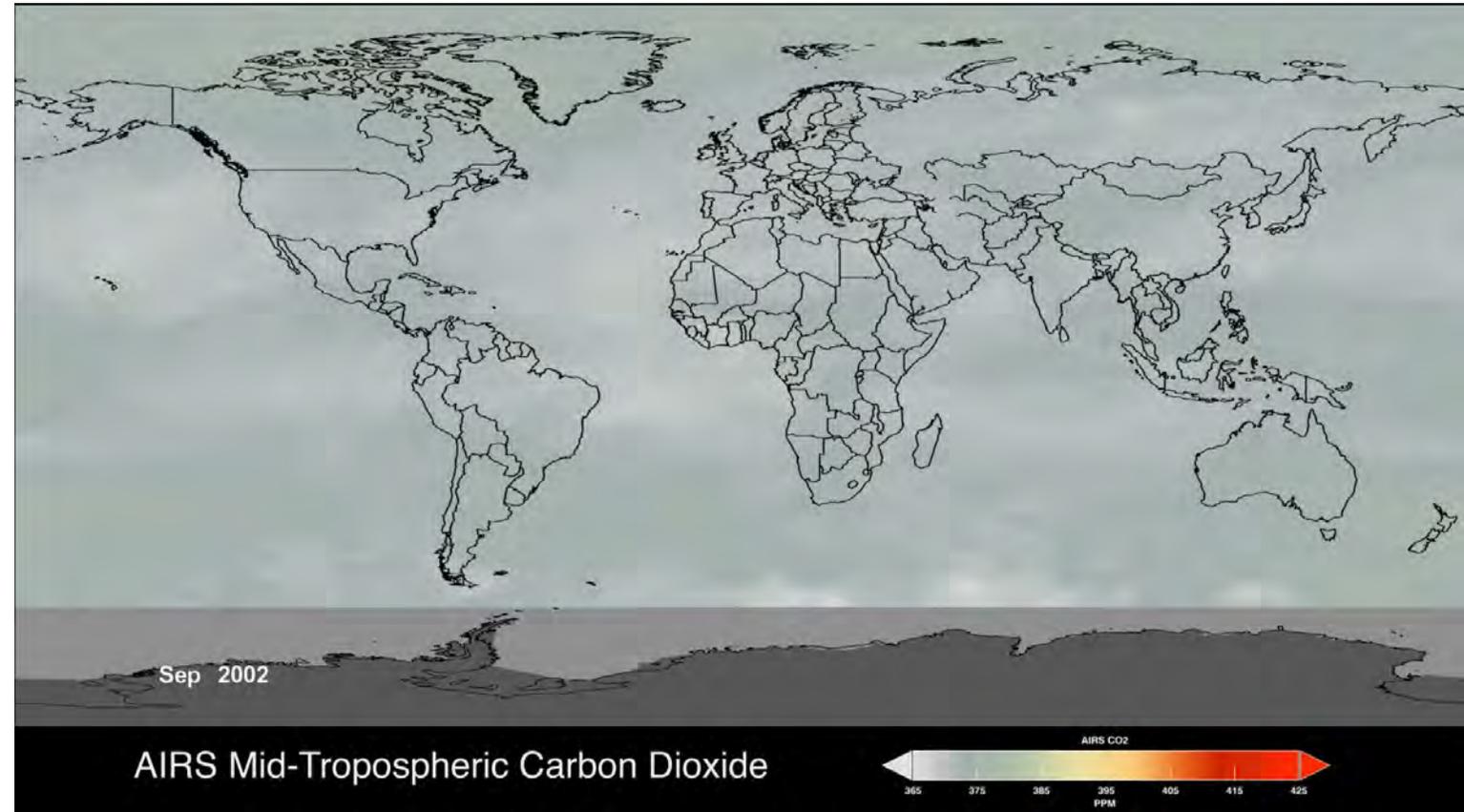
Get targeted looks at cities

OCO-3 lets us take the next step in demonstrating the value of space-based measurements to constrain emissions



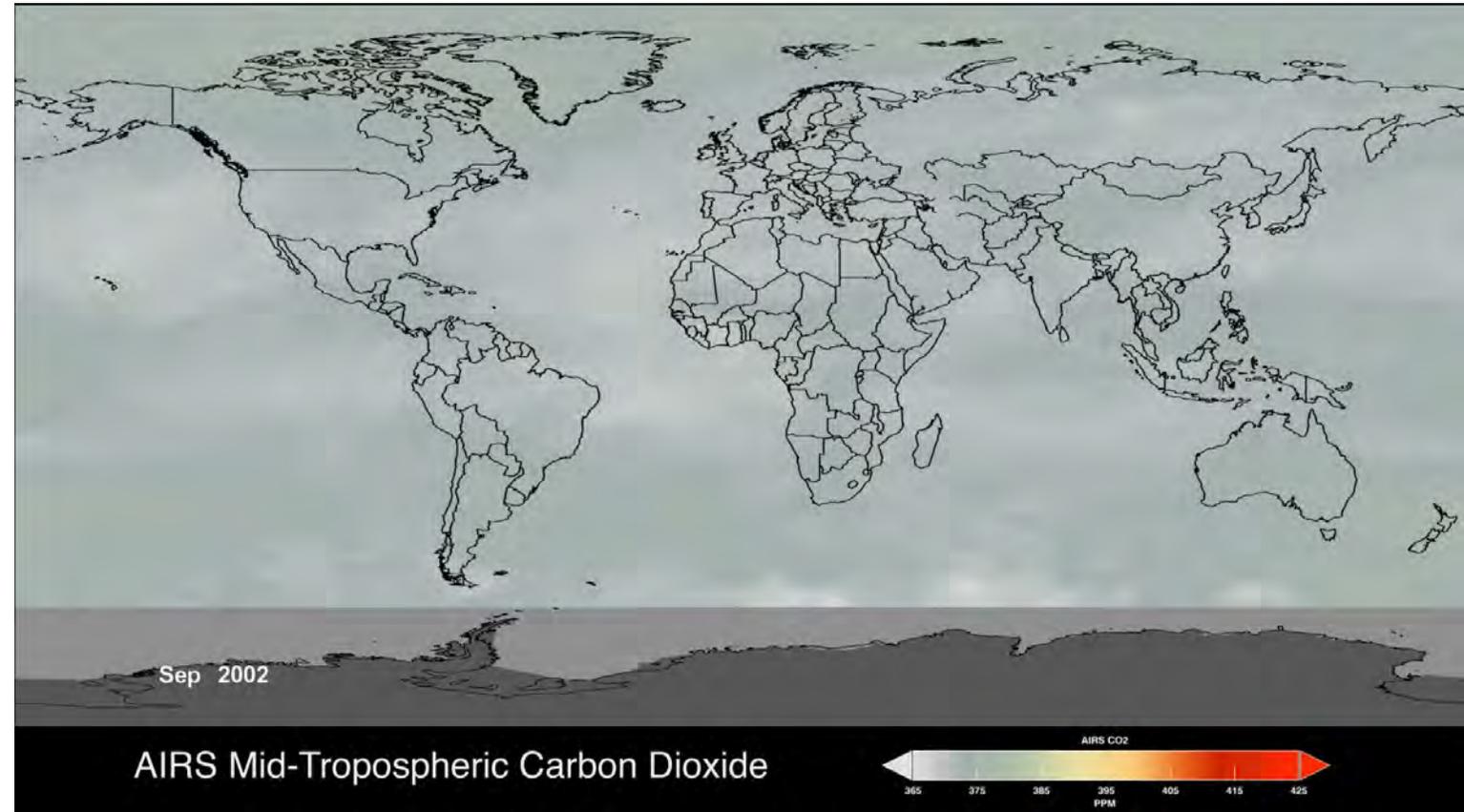
L'apport du spatial : « la combustion de ressources d'énergie fossiles libère du CO₂ dans l'atmosphère ».

On peut proposer une visualisation des données spatiales sur les émissions de CO₂ dans le temps



L'apport du spatial : « la combustion de ressources d'énergie fossiles libère du CO₂ dans l'atmosphère ».

On peut proposer une visualisation des données spatiales sur les émissions de CO₂ dans le temps



Les données spatiales montrent une corrélation mais pas la causalité



L'apport du spatial

« 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 CO₂ libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

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

La montée des
eaux

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

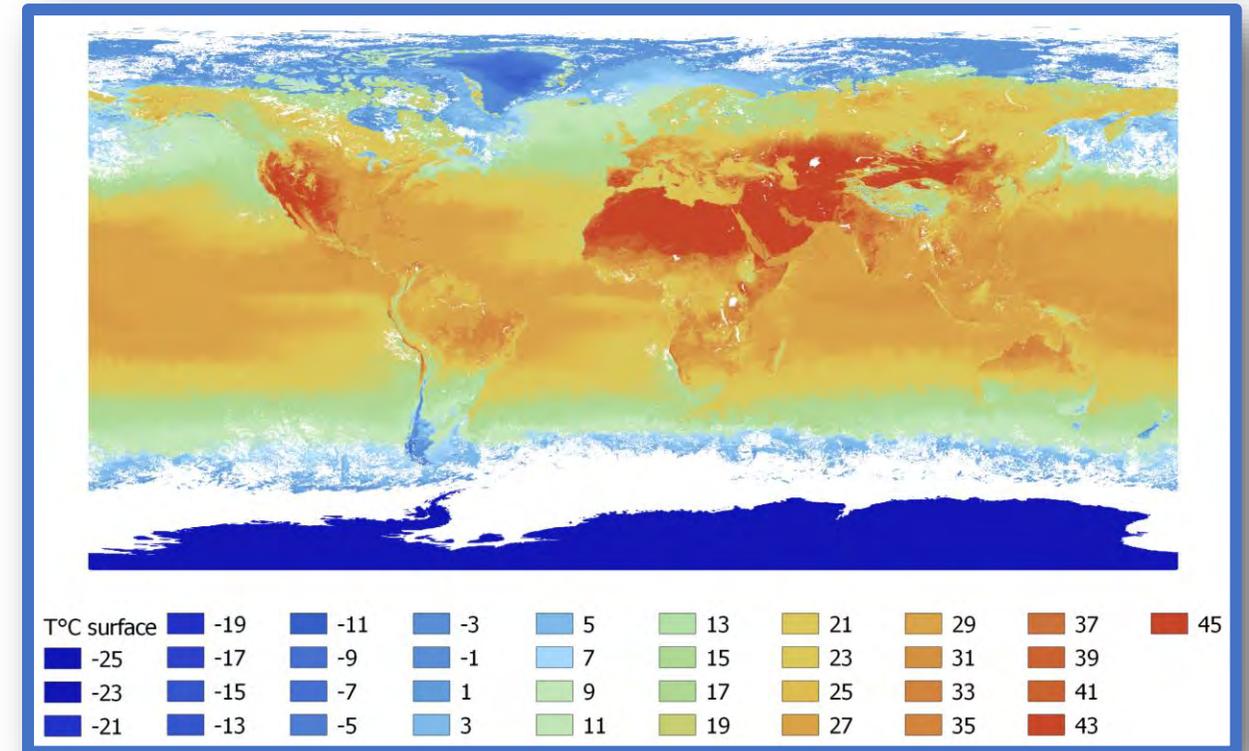
« Il existe un lien entre l'élévation de la température des océans et la montée du niveau des eaux »

L'apport du spatial : « L'augmentation de la concentration en CO₂ entraîne une augmentation de la température »

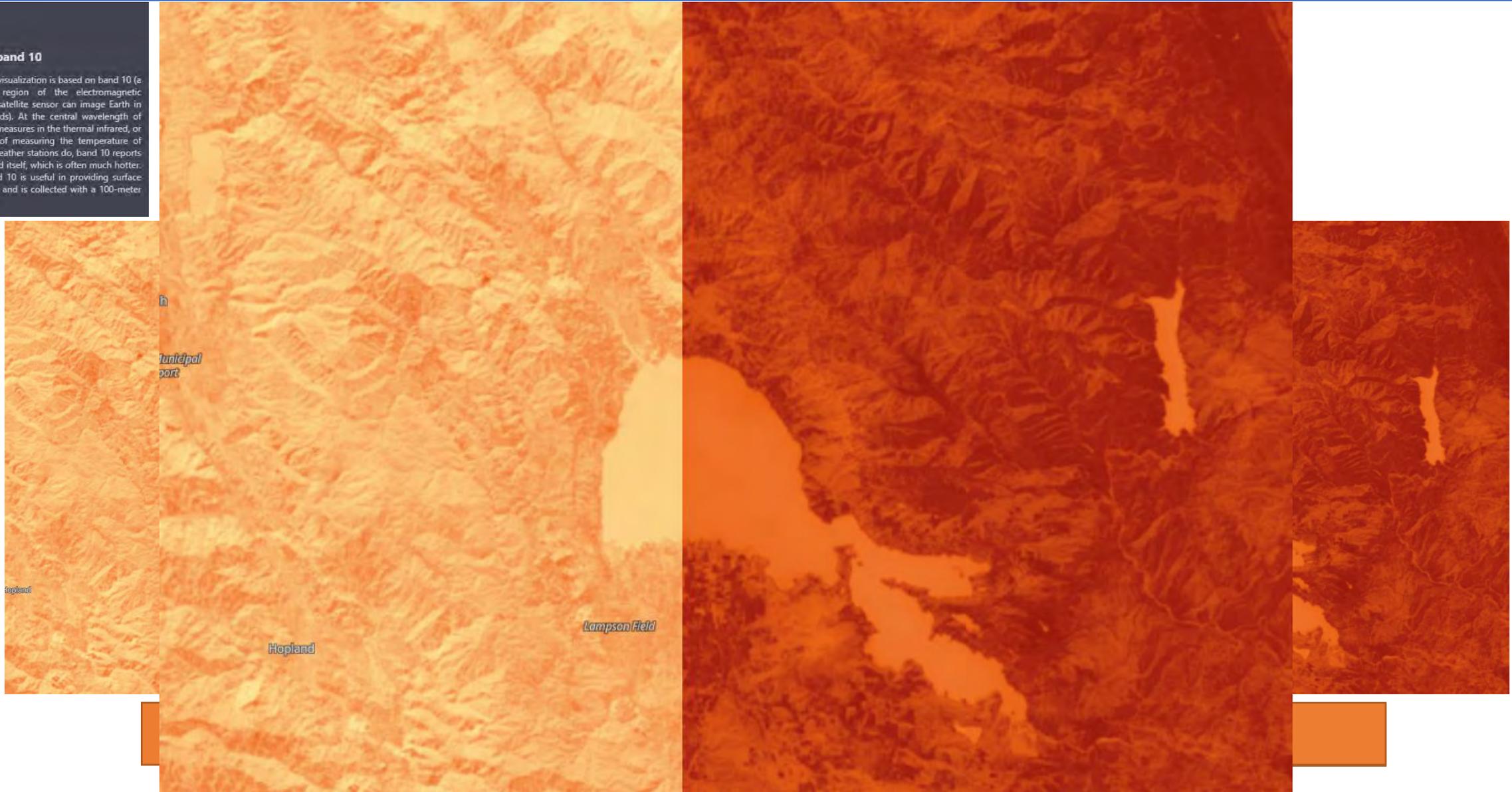
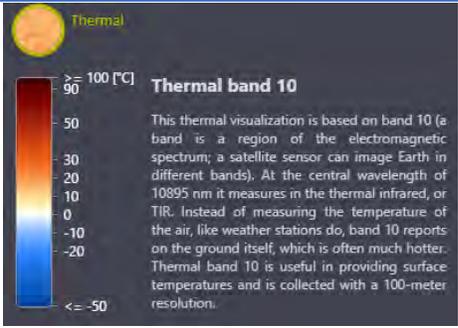
Exploitation des températures de surface (SST) et leurs variations dans le temps.

- ⇒ Fichier exploitable sous QGIS, avec les « valeurs de température »
- ⇒ (1 pixel = 1 valeur mesurée).

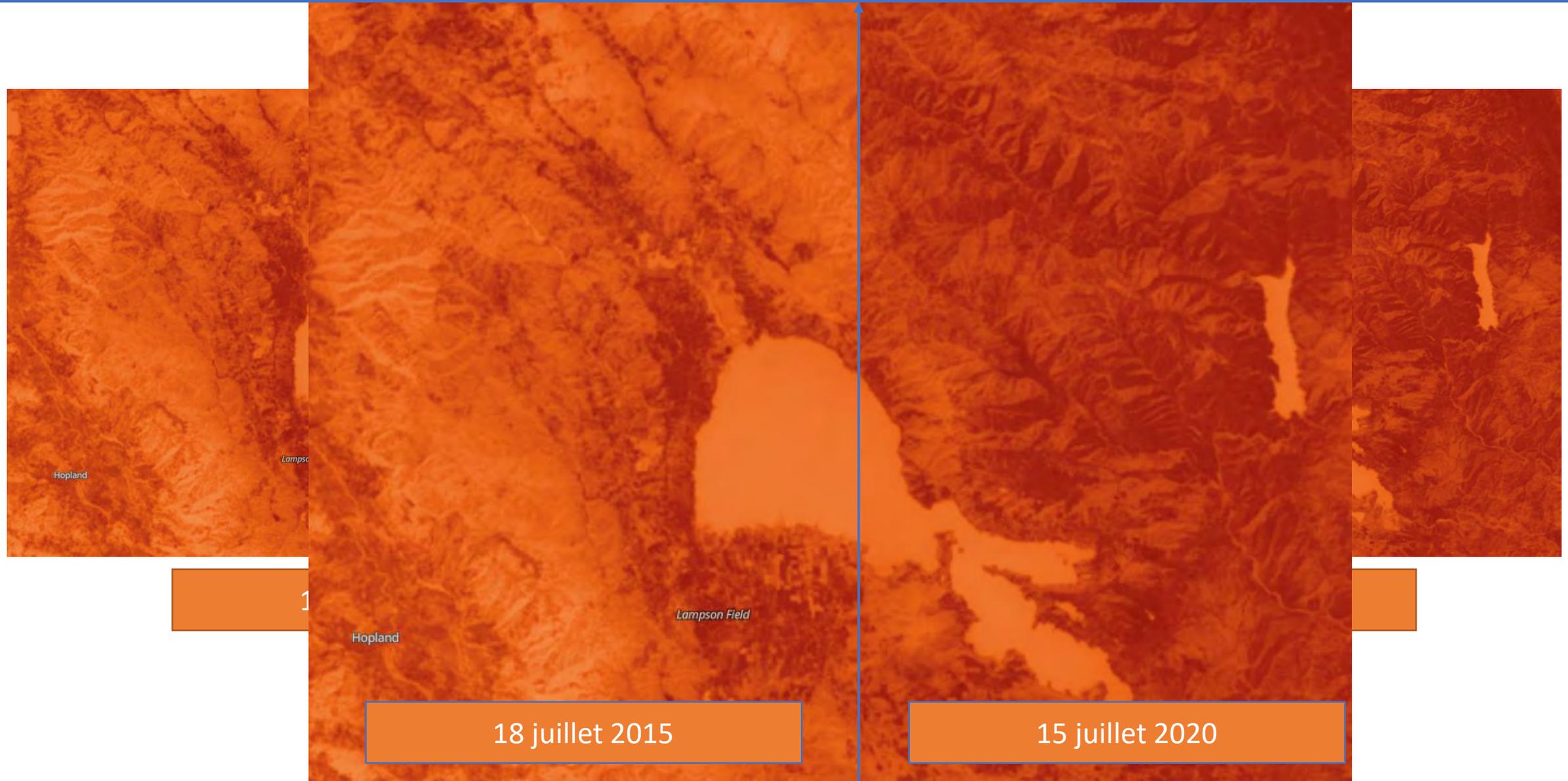
Etude des températures de surface: vous en saurez plus dans l'activité cyclonique tout à l'heure: patience !



L'apport du spatial : « L'augmentation de la concentration en CO₂ entraîne une augmentation de la température »



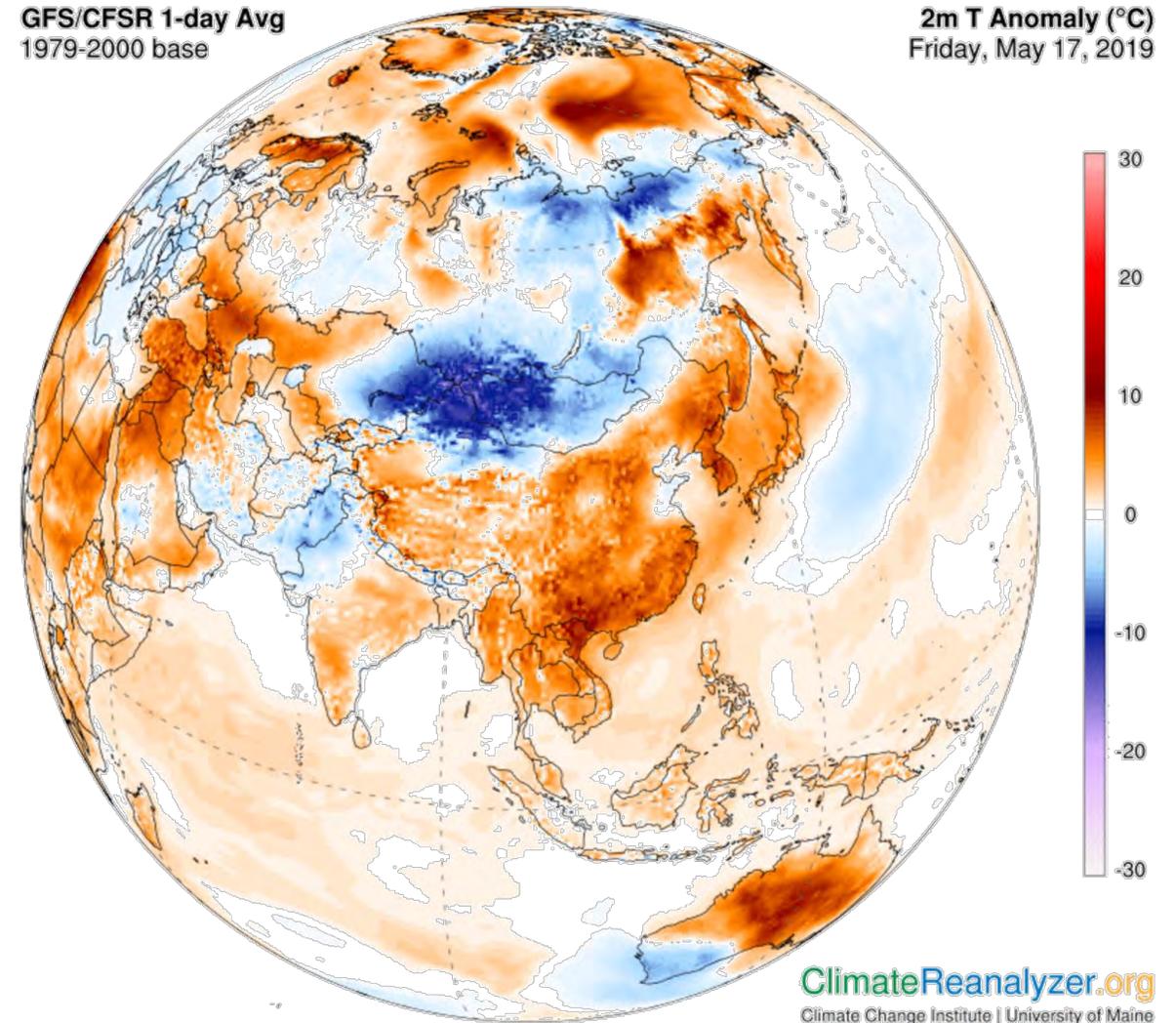
L'apport du spatial : « L'augmentation de la concentration en CO₂ entraîne une augmentation de la température »



L'apport du spatial : « L'augmentation de la concentration en CO₂ entraîne une augmentation de la température »

GFS/CFSR 1-day Avg
1979-2000 base

2m T Anomaly (°C)
Friday, May 17, 2019



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

L'apport du spatial : « L'augmentation de la concentration en CO₂ entraîne une augmentation de la température »

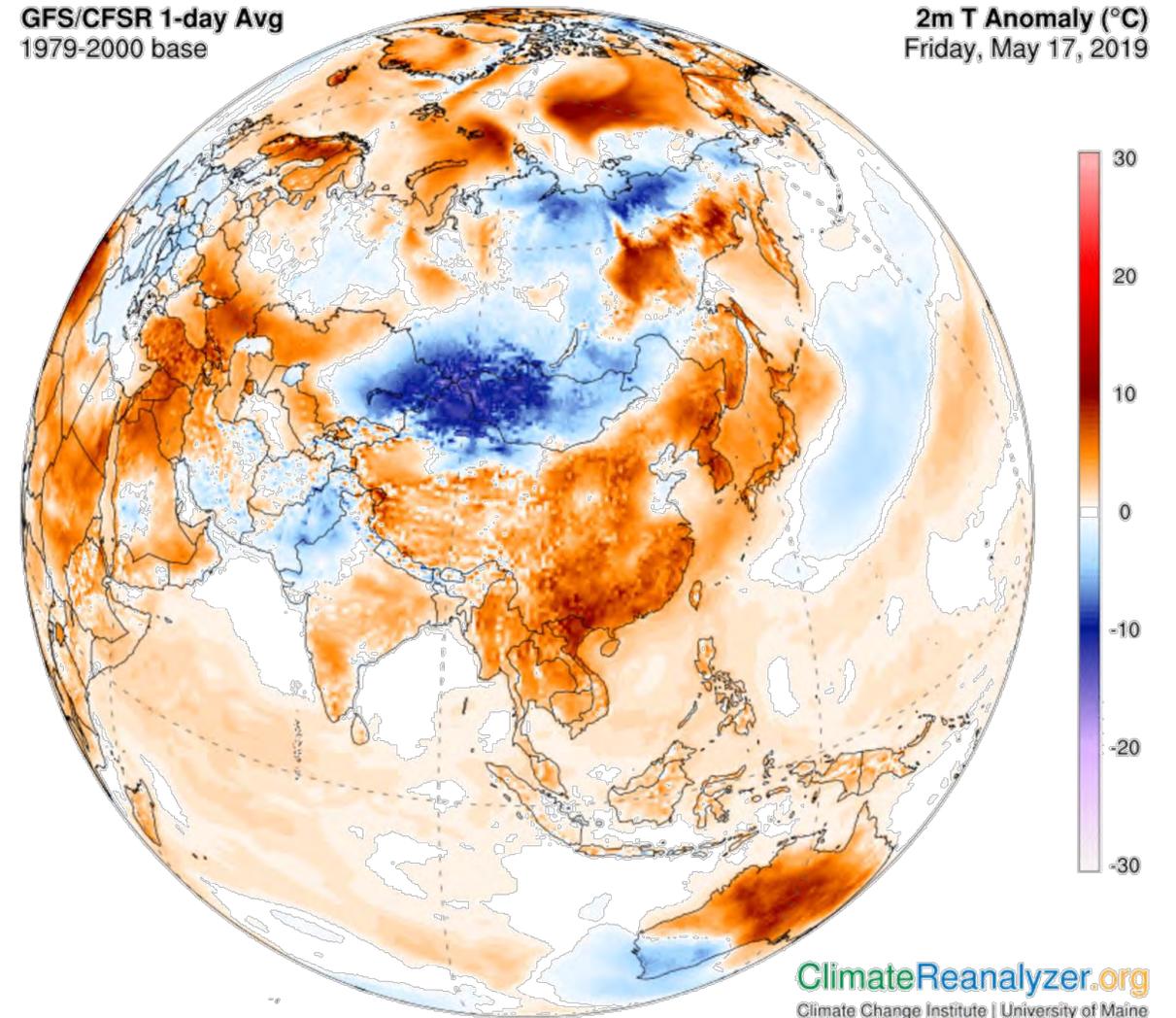


Les données spatiales montrent une corrélation mais pas la causalité

Les données spatiales sont utilisées en revanche pour la construction de **modèles**

GFS/CFSR 1-day Avg
1979-2000 base

2m T Anomaly (°C)
Friday, May 17, 2019



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

L'apport du spatial : « L'augmentation de la concentration en CO₂ entraîne une augmentation de la température »

Production d'une carte colorée de températures

The image shows a screenshot of a Microsoft Excel spreadsheet. At the top, the title bar reads "1-temperatures octobre 2019.xlsx". The ribbon includes "Fichier", "Accueil", "Insertion", "Mise en page", "Formules", "Données", "Révision", "Affichage", "Aide", and "Acrobat". The "Affichage" ribbon is active, showing options for "Règle", "Barre de formule", "Zoom", "Zoom sur la sélection", "Nouvelle fenêtre", "Réorganiser tout", "Figer les volets", "Masquer", "Fractionner", "Côte à côte", "Défilement synchrone", "Rétablir la position de la fenêtre", "Changer de fenêtre", and "Macros". The spreadsheet grid is visible, with column headers labeled "C168" and "C169". The data consists of a large array of numerical values, some of which are highlighted in red, indicating a color-coded temperature map. The values range from approximately -10 to 30.

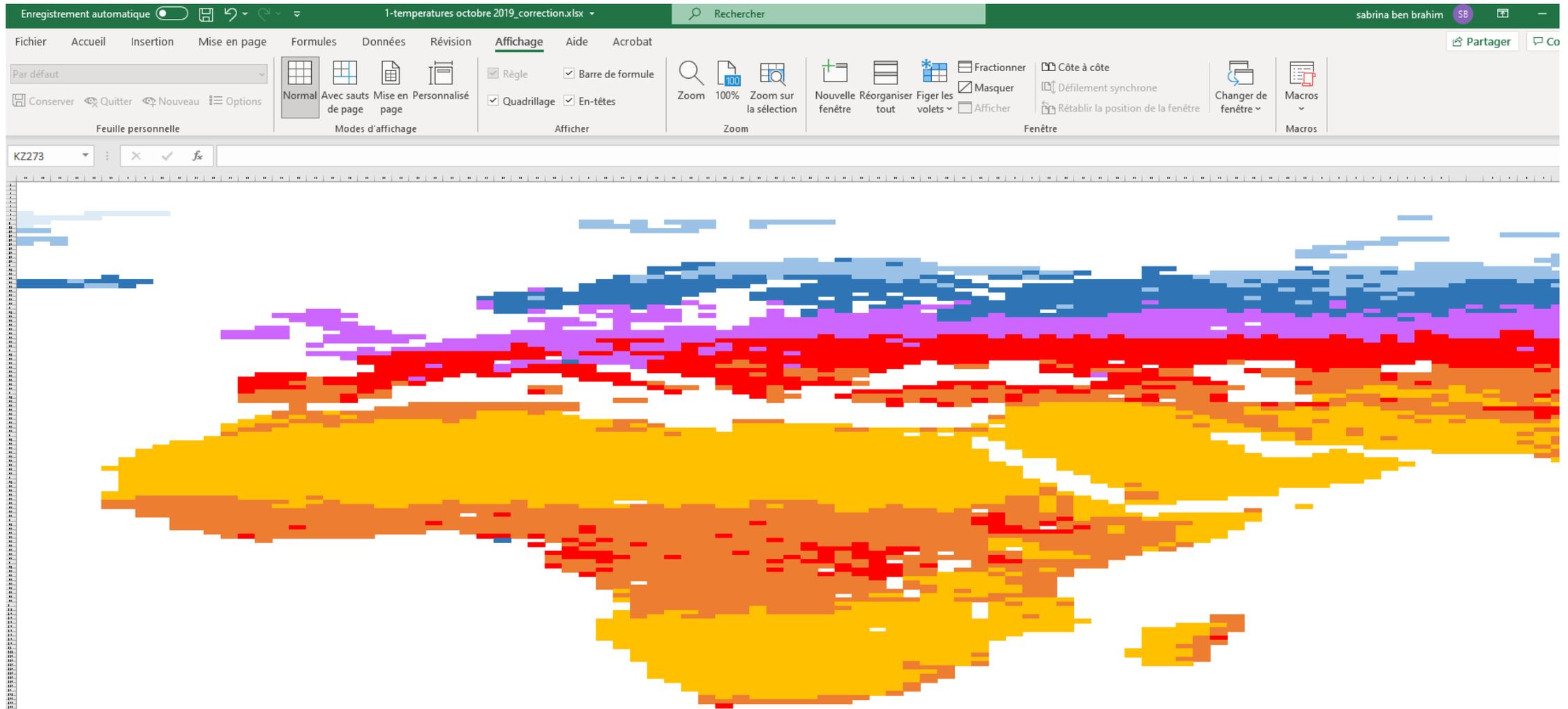
L'apport du spatial : « L'augmentation de la concentration en CO₂ entraîne une augmentation de la température »

Production d'une carte colorée de températures => mise en forme conditionnelle

The image displays two software interfaces side-by-side, illustrating the process of applying conditional formatting to a data set. On the left is Libre Office Calc, and on the right is Microsoft Excel. Both windows show a spreadsheet with numerical data. In Libre Office Calc, the 'Conditionnel' menu is open, showing options like 'Condition...', 'Échelle de couleurs...', and 'Barre de données...'. A dialog box titled 'Style de cellule' is open, showing a 'Condition 1' where the value is 'entre' (between) and the style is 'Nouveau style...'. In Microsoft Excel, the 'Règles de mise en surbrillance des cellules' menu is open, showing options like 'Supérieur à...', 'Inférieur à...', 'Entre...', and 'Égal à...'. A dialog box titled 'Nouvelle règle...' is open, showing a 'Condition 1' where the value is 'entre' and the style is 'Nouveau style...'. The text 'Puis Nouveau Style > Arrière-plan > Couleur :' is written below the Libre Office Calc dialog box.

L'apport du spatial : « L'augmentation de la concentration en CO₂ entraîne une augmentation de la température »

Production d'une carte colorée de températures



L'apport du spatial

« 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 CO₂ libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

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

La montée des eaux

« Il existe un lien entre la fonte des glaces 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 »

Approche surfacique
(télédétection passive)

Approche volumique
(télédétection active)

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

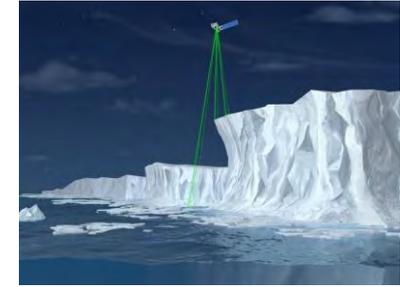
ICESat-2 : Satellite de la NASA mis en orbite en septembre 2018

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.

Ice sat2 permet de cartographier la glace en surface et en épaisseur



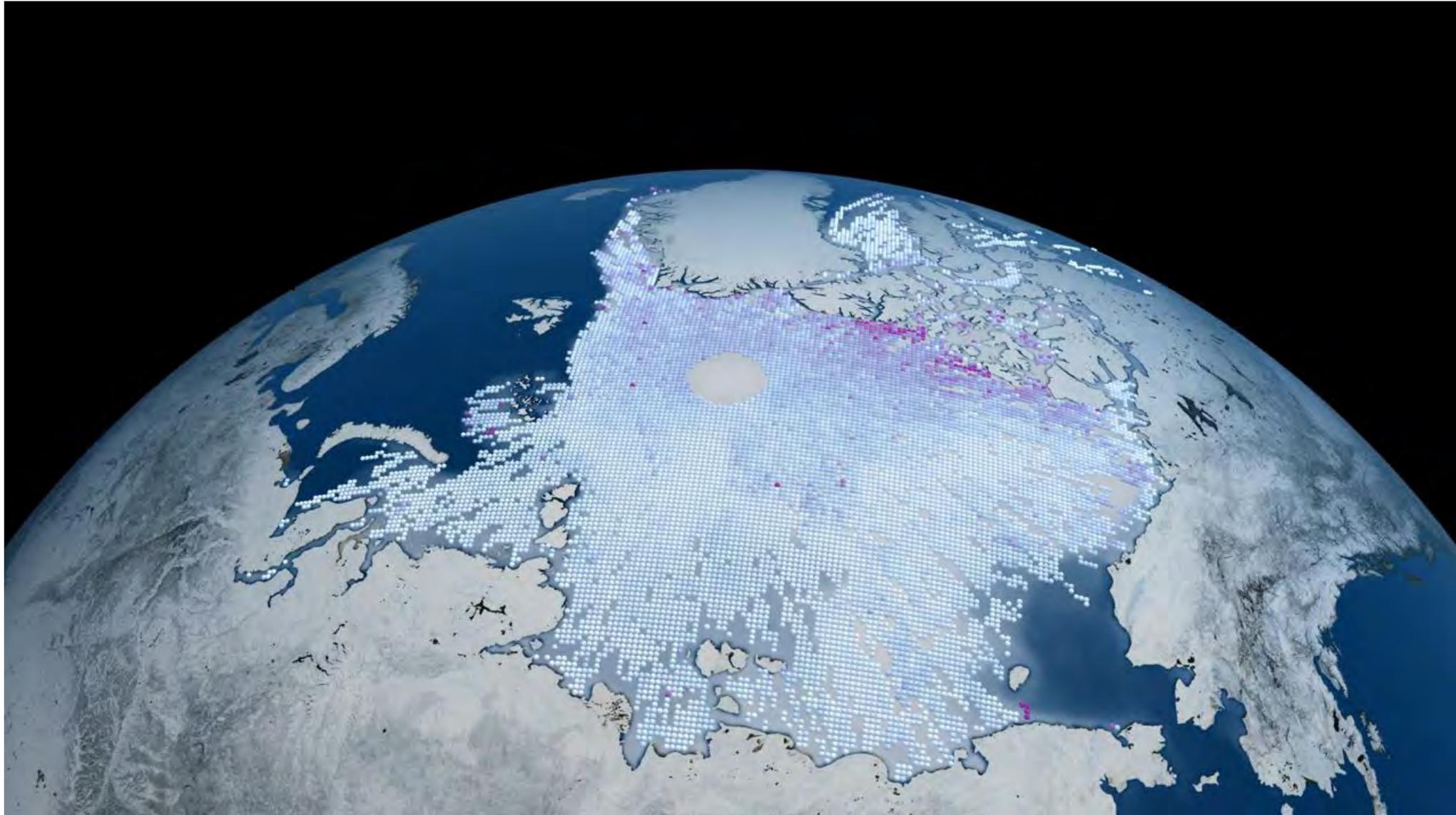
L'apport du spatial : « Une surveillance particulière des pôles »

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



1- L'apport du spatial : « La banquise fond et cela fait monter le niveau marin »

NON



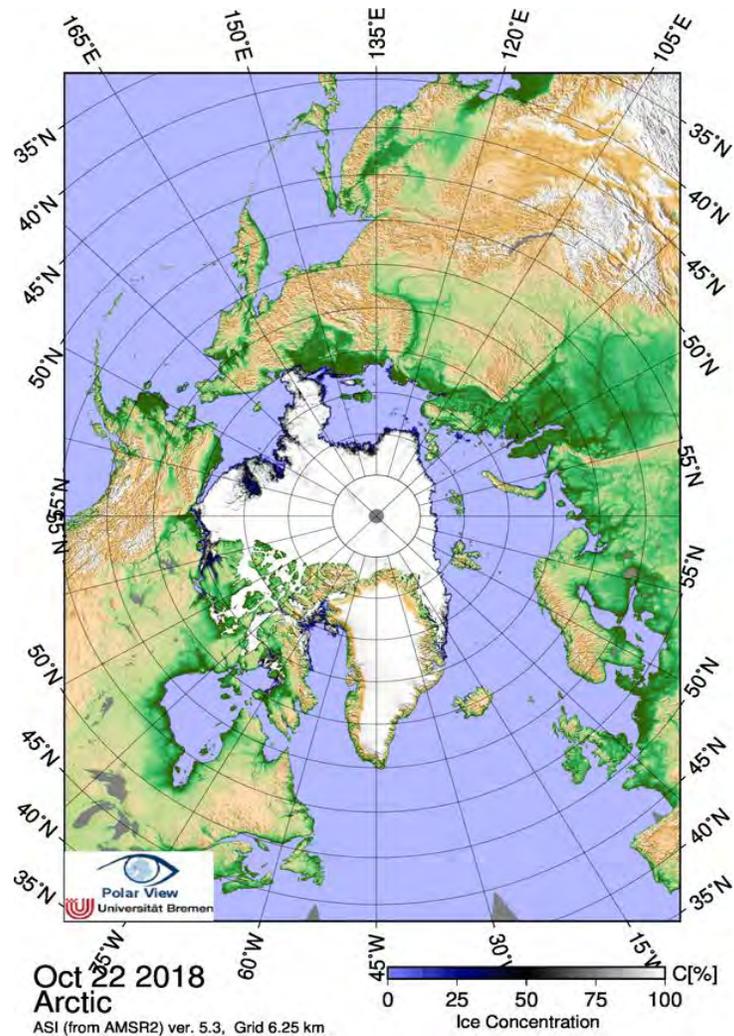
On ne confond pas

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

Observation de l'étendue de la banquise par le spatial.

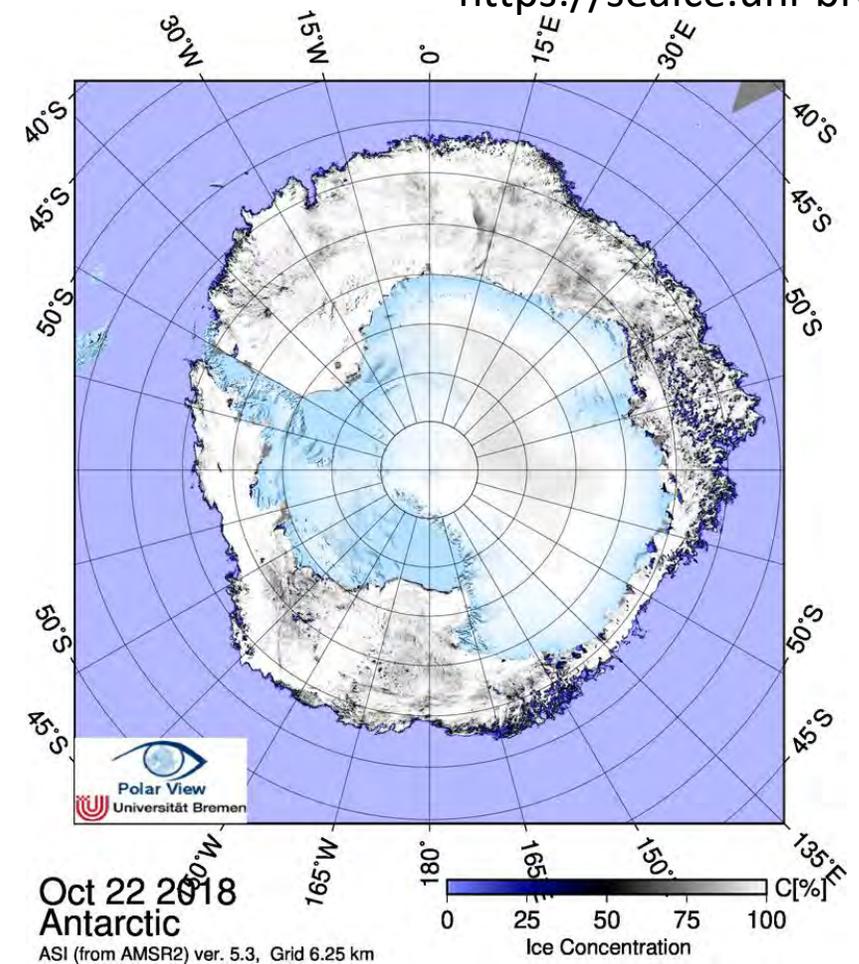
- Grande étendue mais saisonnalité
- Volume discutable
- Niveau marin

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



Arctic sea ice coverage for the last 30 days

<https://seaice.uni-bremen.de>



Antarctic sea ice coverage for the last 30 days

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

OUI

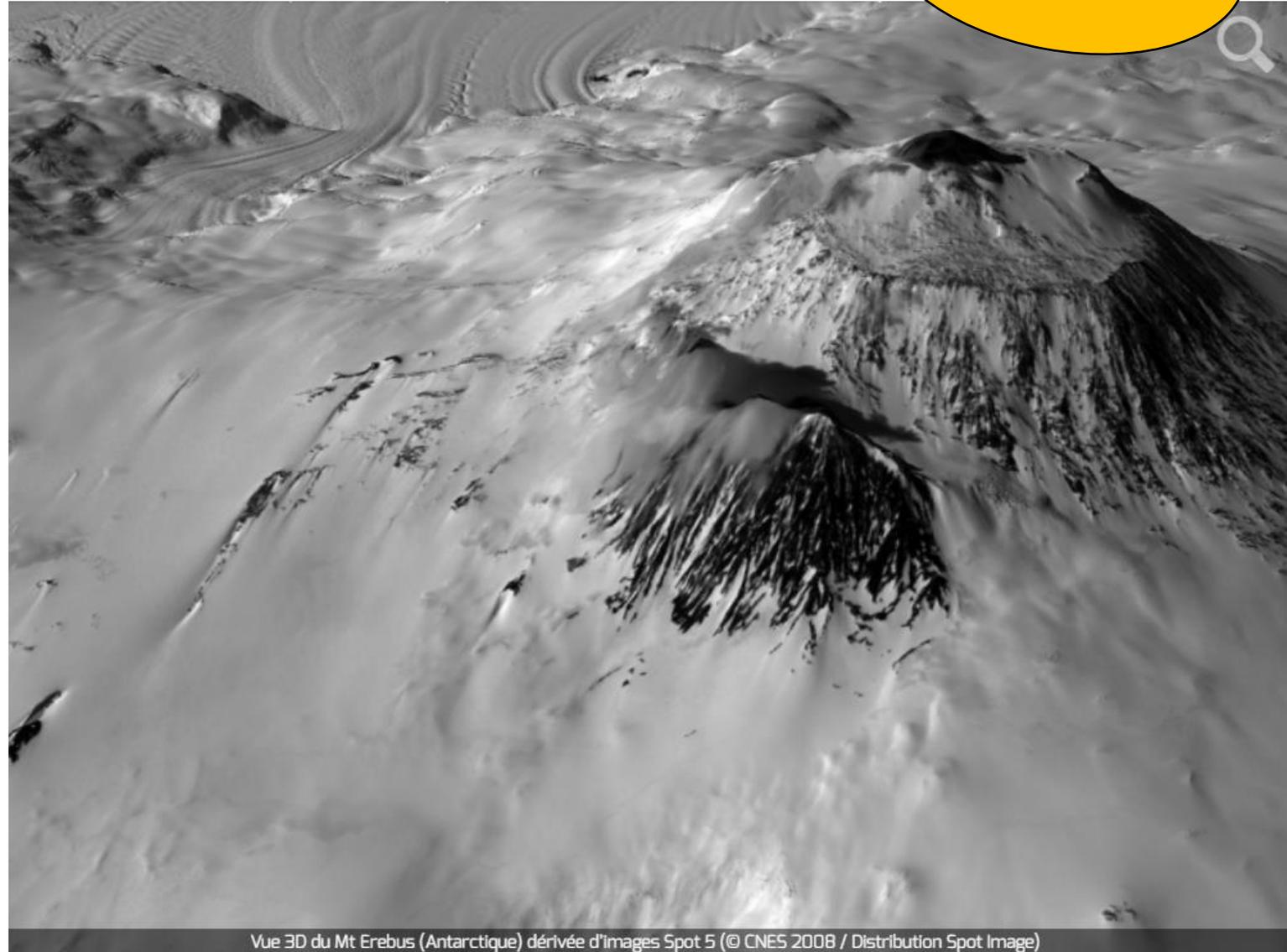
Images satellites et leurs traitements

- **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

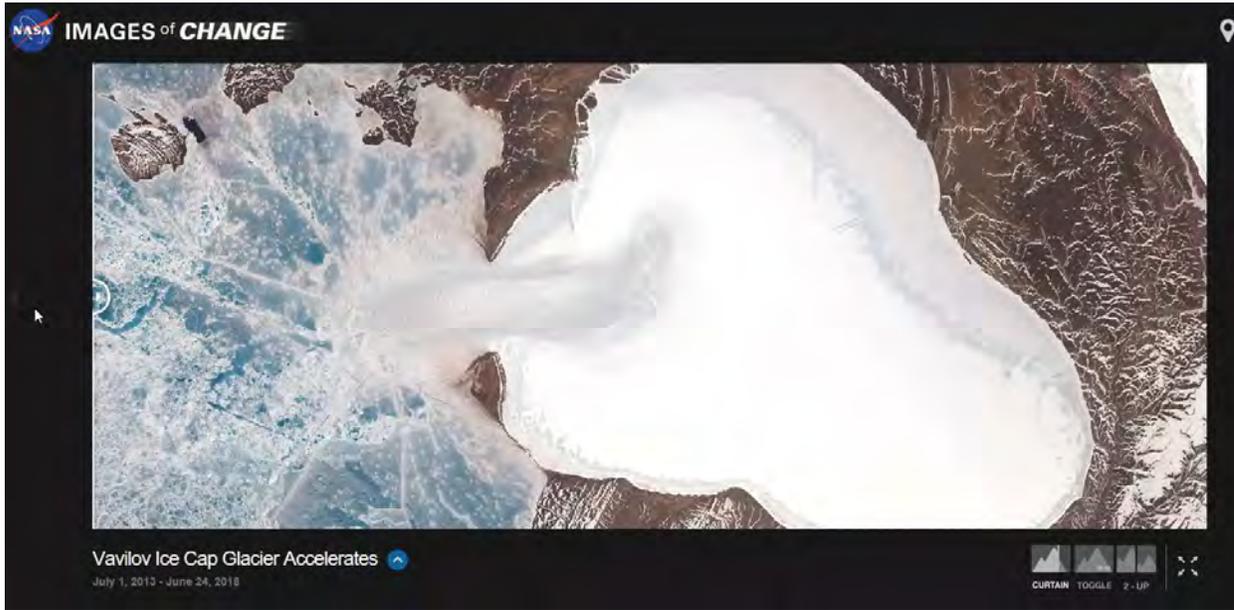
Le projet SPIRIT (*Spot 5 Stereoscopic Survey of Polar Ice : Reference Images and Topographies*) a été lancé afin d'établir une topographie de référence pendant la 4e année polaire internationale (API). Projet CNES



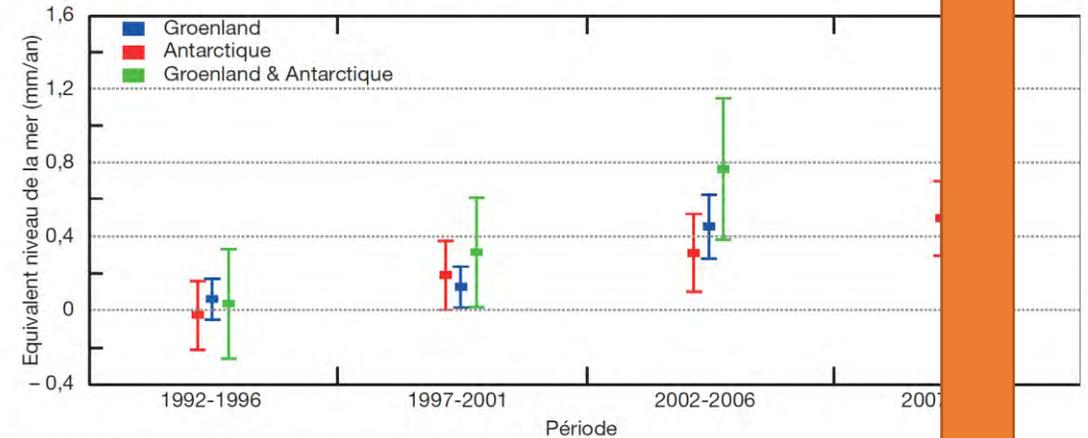
Vue 3D du Mt Erebus (Antarctique) dérivée d'images Spot 5 (© CNES 2008 / Distribution Spot Image)

L'apport du spatial : « On peut **observer** le recul d'un glacier »

OUI



FONTE DES CALOTTES GLACIAIRES



Source : Giec, 1^{er} 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 15,0 mm/an). Les pertes les plus importantes ont été observées sur la dernière décennie (2002-2012).

Mais attention





Comparer ce qui est comparable ! (*Biais de confirmation*)

NASA IMAGES of **CHANGE**

Neumayer Glacier shrinks on South Georgia Island [↕](#)

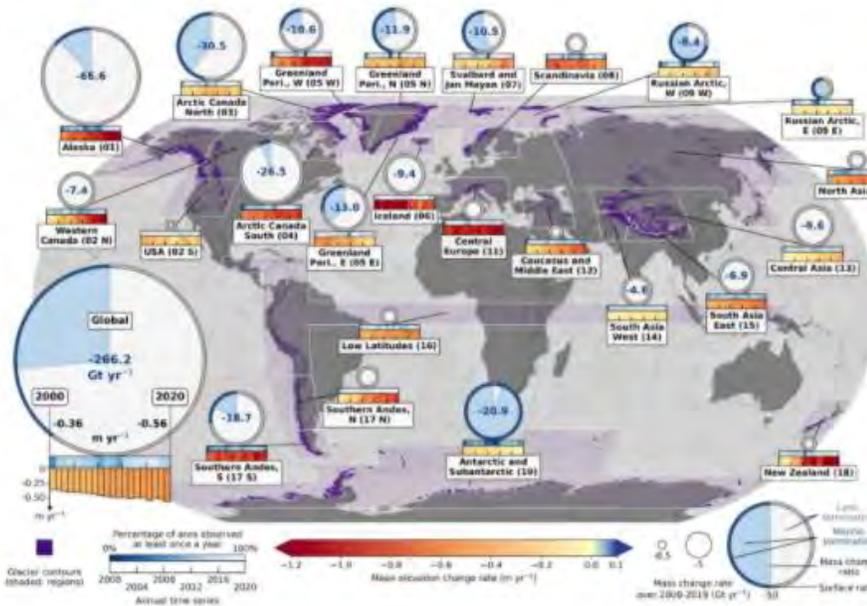
January 11, 2005 - September 14, 2016

CURTAIN TOGGLE 2-UP

3- L'apport du spatial : « Mesurer le recul d'un glacier : peut-on le vérifier ? »

OUI

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.



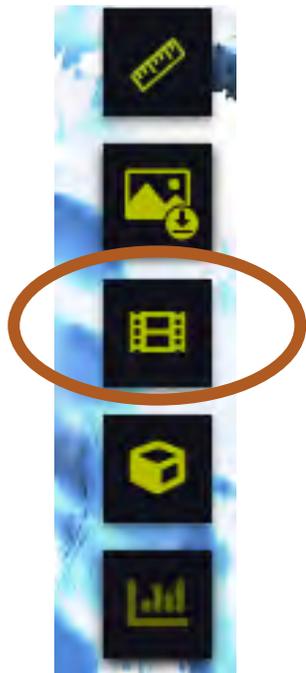
Pertes de masse des glaciers entre 2000 et 2019 en milliards de tonne par an. © Hugonnet et al., Nature, 2021



L'apport du spatial : « Mesurer le recul d'un glacier : peut-on le vérifier ? »

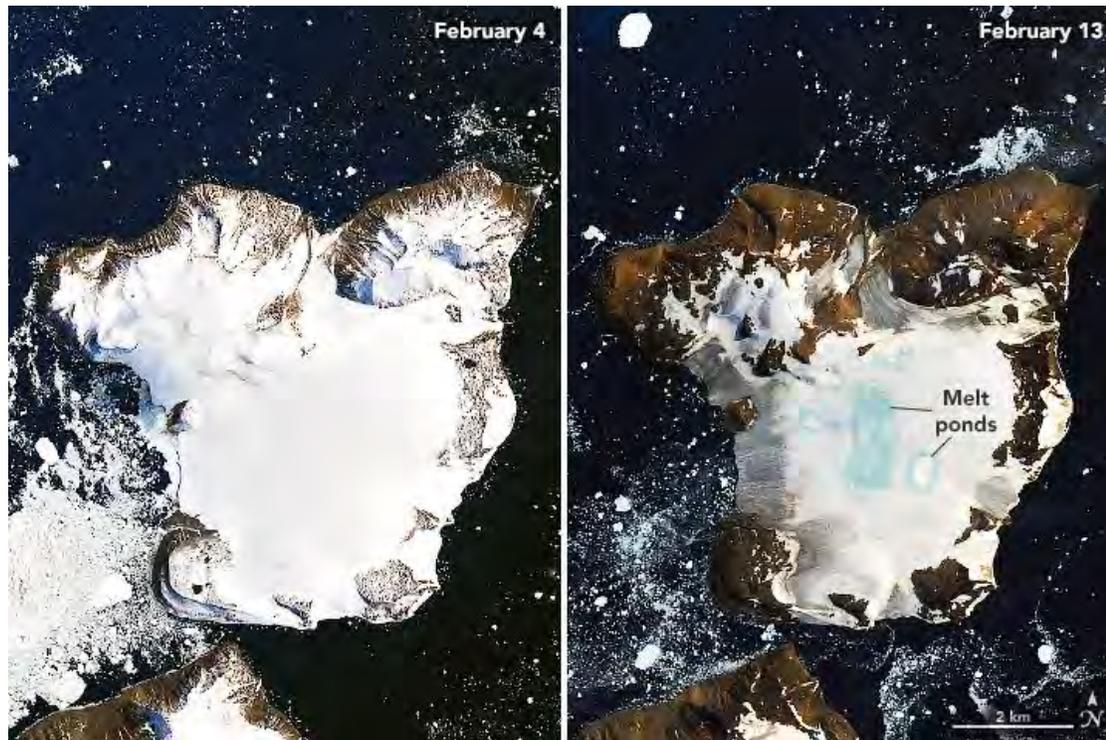


upsala, pantagonie

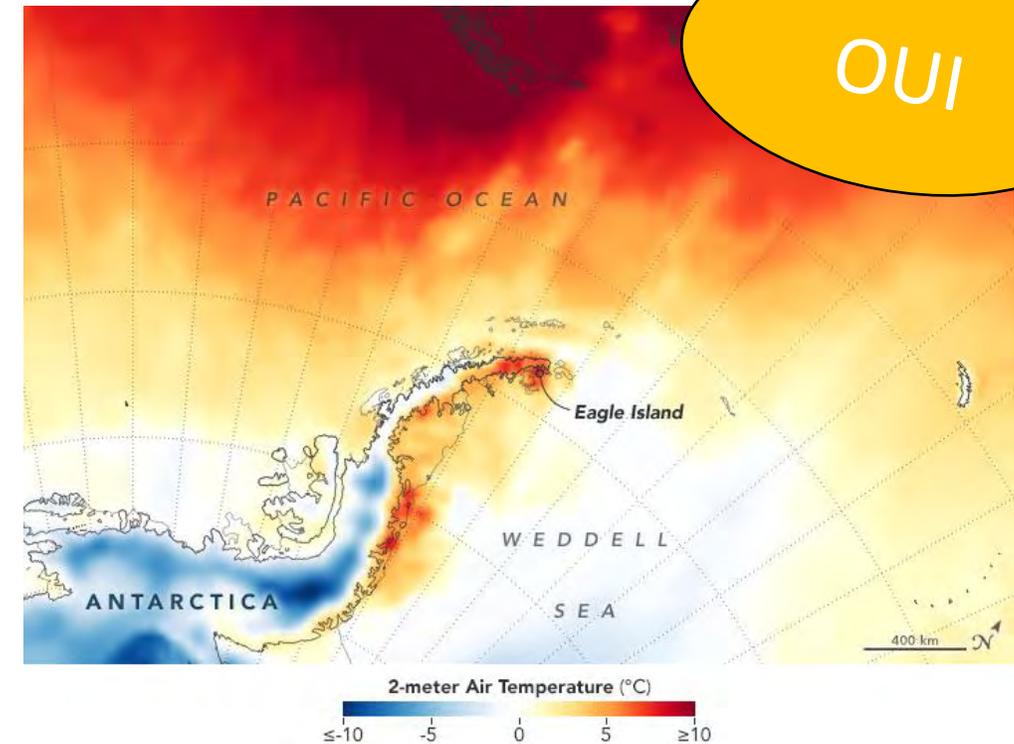


4- L'apport du spatial : « Un lien établi entre l'augmentation de la température et la fonte des glaciers »

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

Une activité en physique

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/>



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.

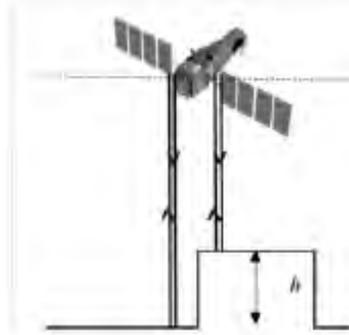
10 000 fois par seconde, le laser d'ATLAS émet une impulsion lumineuse qui se déplace à la vitesse de $3,00 \times 10^8$ m/s.

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

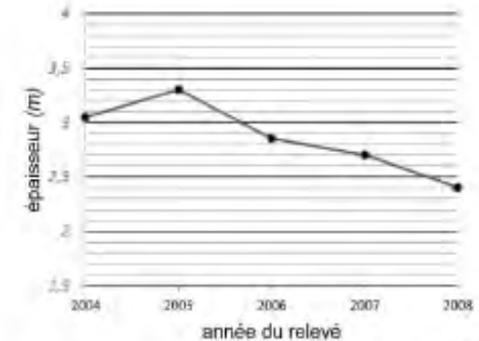
Avant ce lancement de la NASA, le dernier satellite à avoir étudié l'altitude de la surface de la calotte glaciaire a été mis en orbite en 2004. Cependant, il ne relevait l'altitude de la surface de la calotte glaciaire qu'une fois par an. Le document 3 présente l'évolution de l'épaisseur de la calotte glaciaire du continent Antarctique durant les quatre années de fonctionnement du satellite

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

Question 1. 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 Δt .

Cette variation Δt est la durée mise par le signal pour réaliser un aller-retour sur une hauteur h .

Montrer que la valeur de Δt lorsque le satellite survole un dénivelé de hauteur de $h = 1,0$ m est de $6,7 \times 10^{-9}$ s.

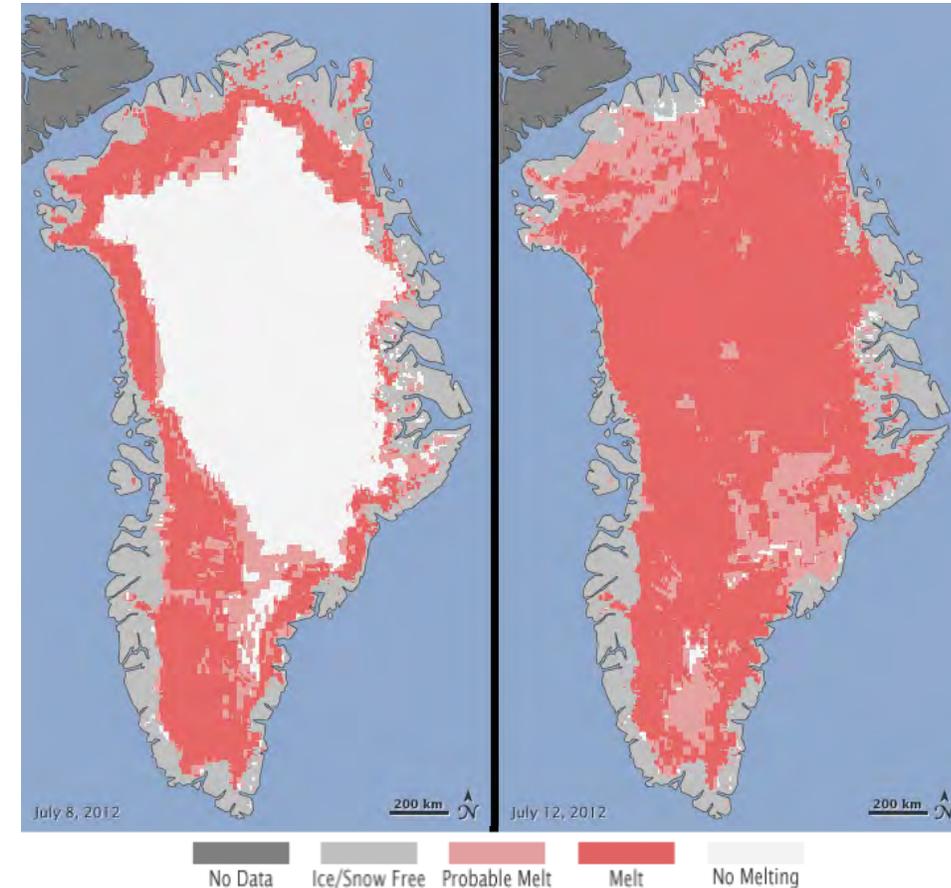
La résolution de l'altimètre (taille du plus petit relief détectable) est directement liée à la précision du chronomètre (plus petit intervalle de temps mesurable) qui est embarqué sur le satellite.

Question 2. 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 μ 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.

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

L'apport du spatial

« 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 CO₂ libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

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

La montée des
eaux

« Il existe un lien entre la fonte des glaces 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 »

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

Le pouvoir réfléchissant d'une surface est appelé «albédo». La neige et la glace brillantes ont un albédo 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 albédo beaucoup plus faible.

Plus l'albédo 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,

Une rétroaction positive



MetOp est une famille de trois satellites météorologiques placés en orbite polaire héliosynchrone

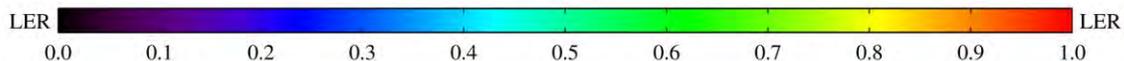
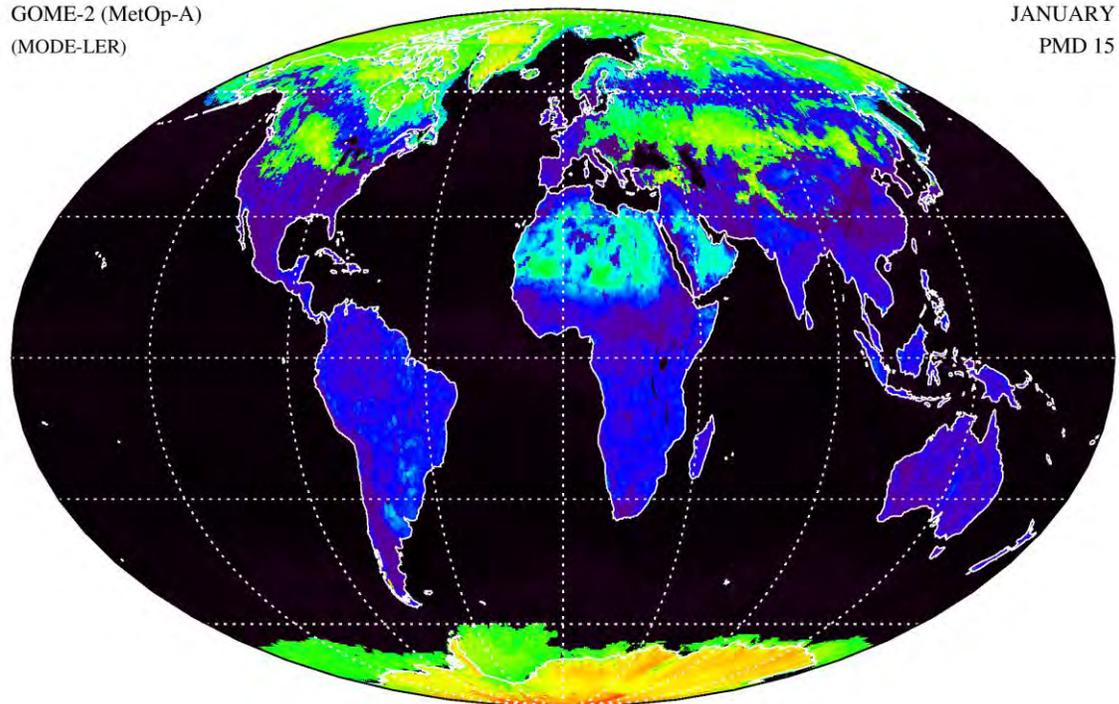
GOME-2 est un spectromètre à balayage qui capte la lumière réfléchie par la surface et l'atmosphère de la Terre.

Source: <https://www.esa.int/>

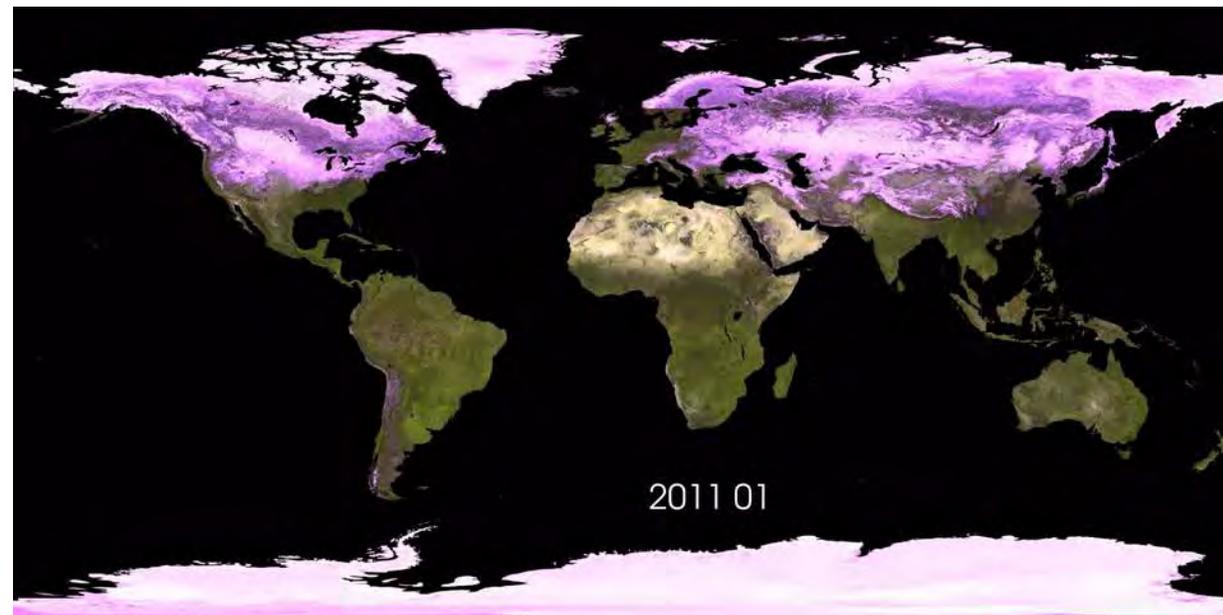
Mesure de l'albedo

GOME-2 (MetOp-A)
(MODE-LER)

JANUARY
PMD 15



Composition colorée de l'occupation des sols



<https://earth.esa.int/eogateway/missions/metop>



Les données spatiales permettent
d'établir un lien de causalité

L'apport du spatial

« 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 CO₂ libérée par l'activité humaine et la montée du niveau des eaux »

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

La montée des
eaux

« Il existe un lien entre la fonte des glaces 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 »

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



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



NASA WORLDVIEW

Layers Events Data

SEA SURFACE TEMPERATURE

Sea Surface Temperature (L4)
Multi-mission / GHRSSST



< 0.00 °C ≥ 32.00 °C

REFERENCE

- Place Labels
© OpenStreetMap contributors, Imagery © Mapbox
- Coastlines / Borders / Roads
© OpenStreetMap contributors
- Coastlines
© OpenStreetMap contributors

BASE LAYERS

- Corrected Reflectance (True Color)
WorldView-2 / WV2
- Corrected Reflectance (True Color)
WorldView-3 / WV3
- Corrected Reflectance (True Color)
Aqua / MODIS
- Corrected Reflectance (True Color)
Terra / MODIS

Group Similar Layers

+ Add Layers Start Comparison



« La montée des eaux est en lien avec l'utilisation de ressources d'énergies fossiles par l'Homme »

« La montée des eaux est en lien avec la quantité de CO₂ libérée par l'activité humaine ».

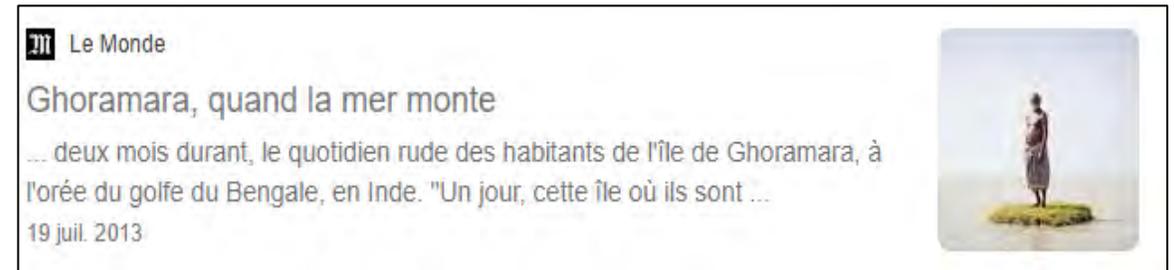
« La montée des eaux est en lien avec l'albedo »

La montée des
eaux

« La montée des eaux est en lien avec la fonte des glaces ».

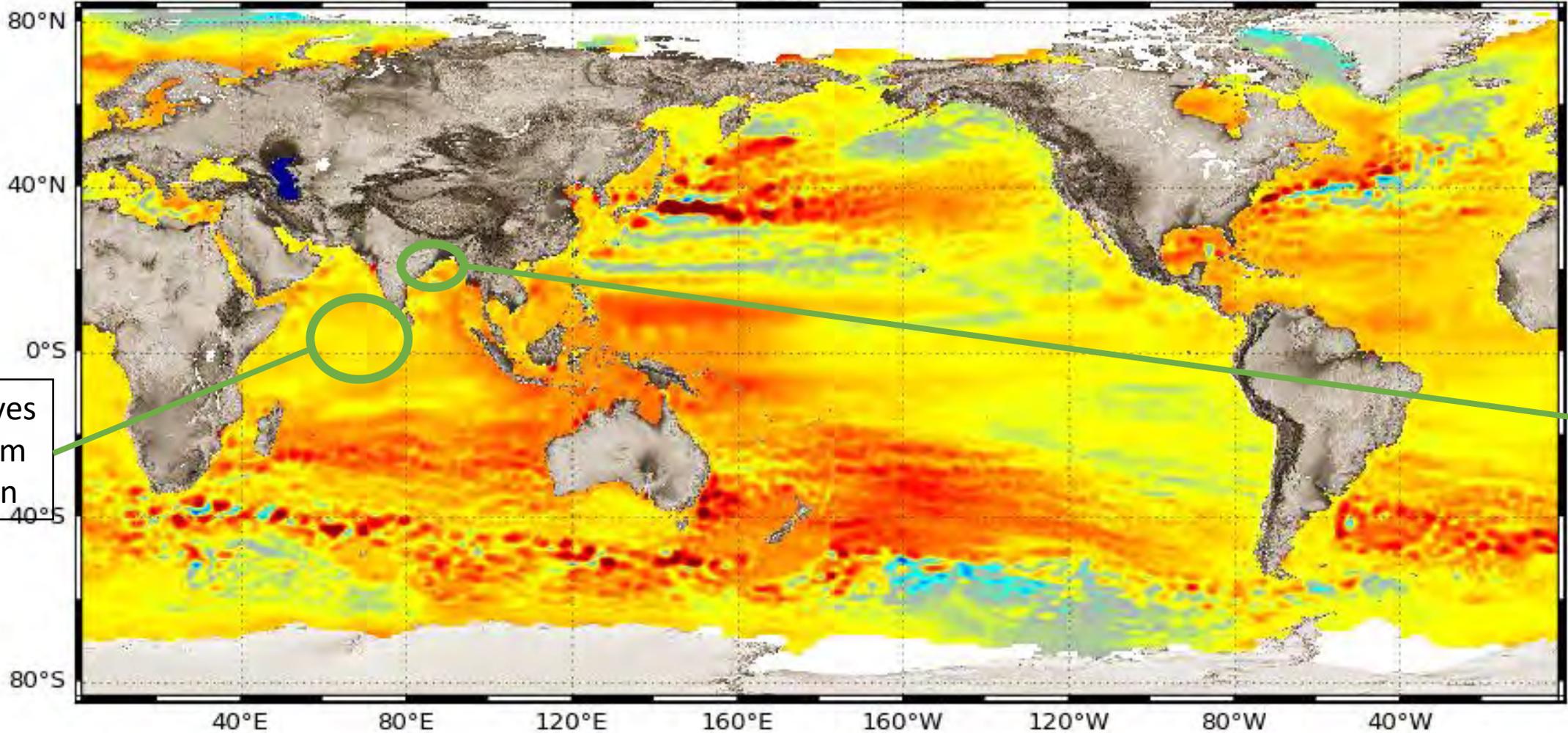
« La montée des eaux est en lien avec la température des océans »

Les Maldives vs Ghoramara



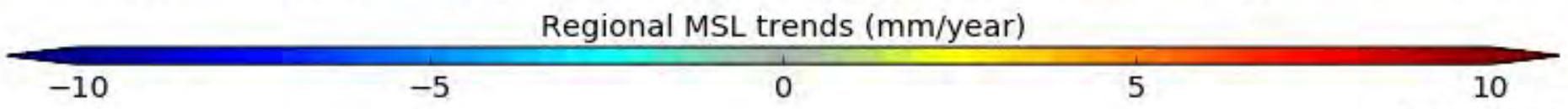
Multi-Mission Sea Level Trends

Period: Jan-1993 to May-2017



Maldives
4,4 mm
par an

Ghorama
ra
0,5 mm
par an



© CNES/LEGOS/CLS, 2017



L'île de Ghoramara

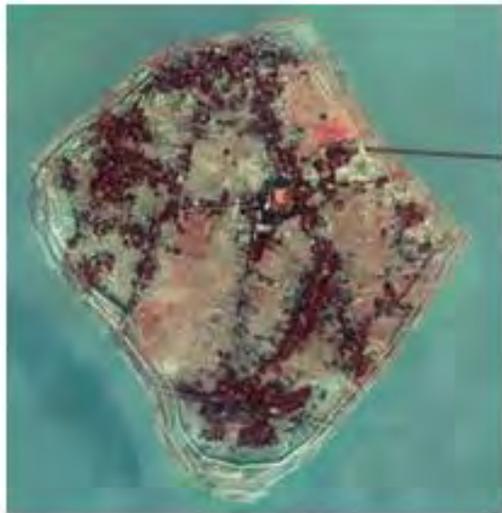
L'île de Ghoramara est devenue un exemple très souvent repris pour illustrer la question des conséquences des modifications de l'environnement.

Il a en particulier fait l'objet d'articles de presse lors de la préparation de la COP 21.



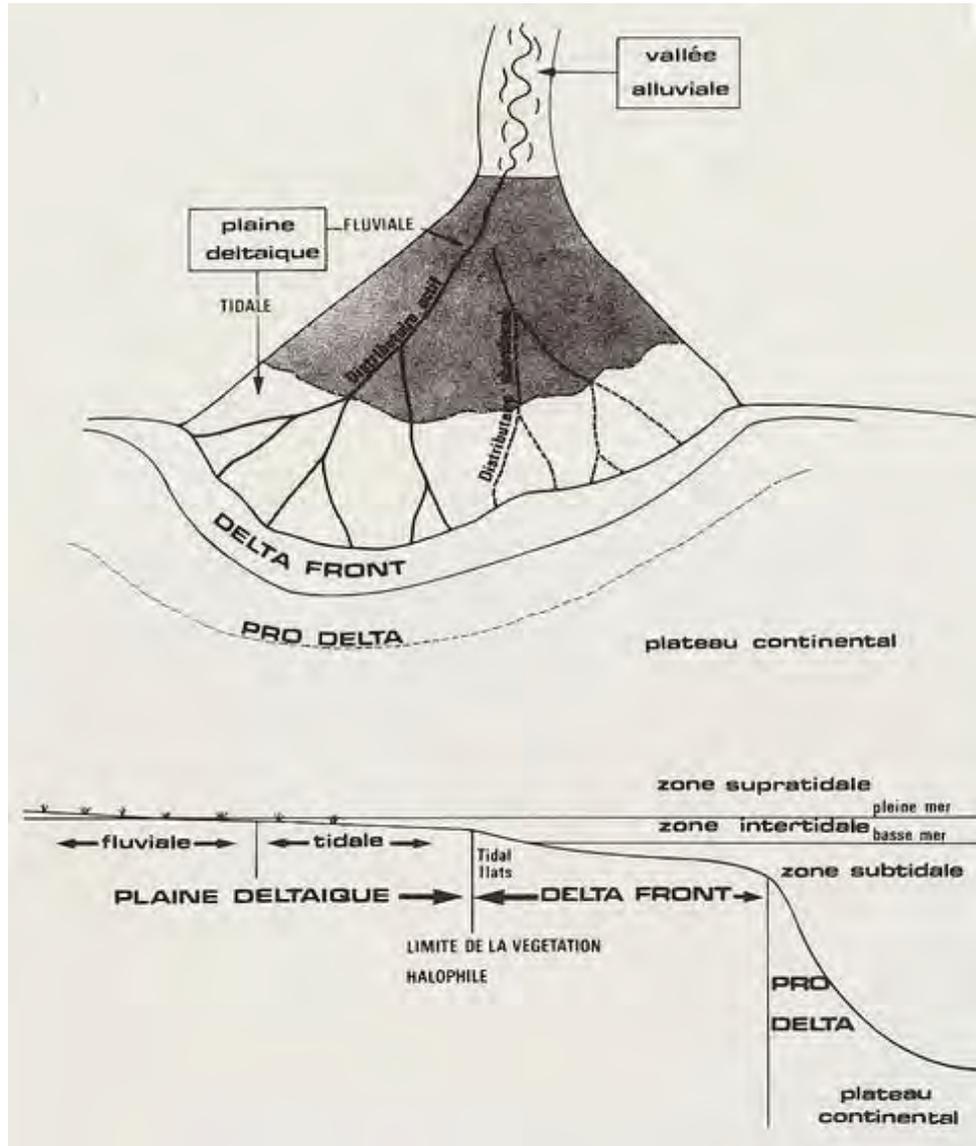


L'île de Ghoramara



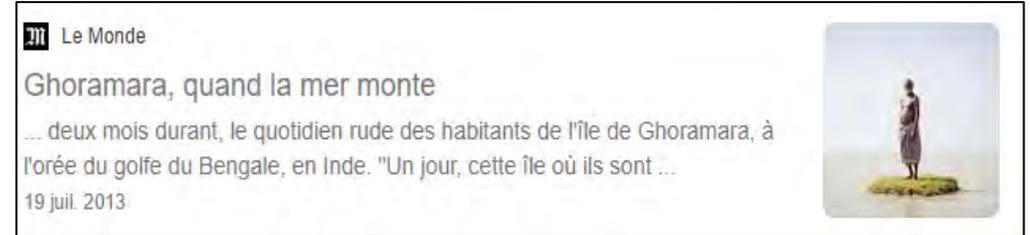
[Superposition des photos SPOT](#) entre 1989 et 2016 (site Airbus Defense and Space)

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





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.



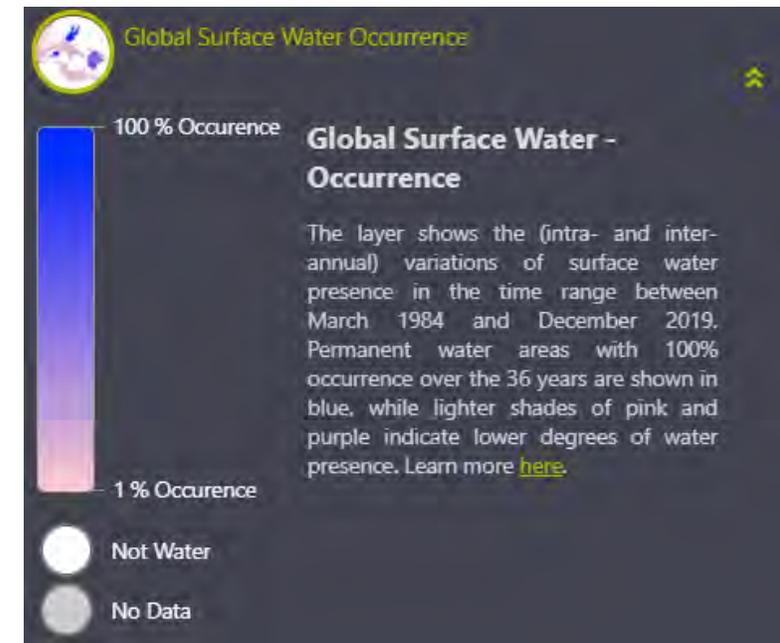
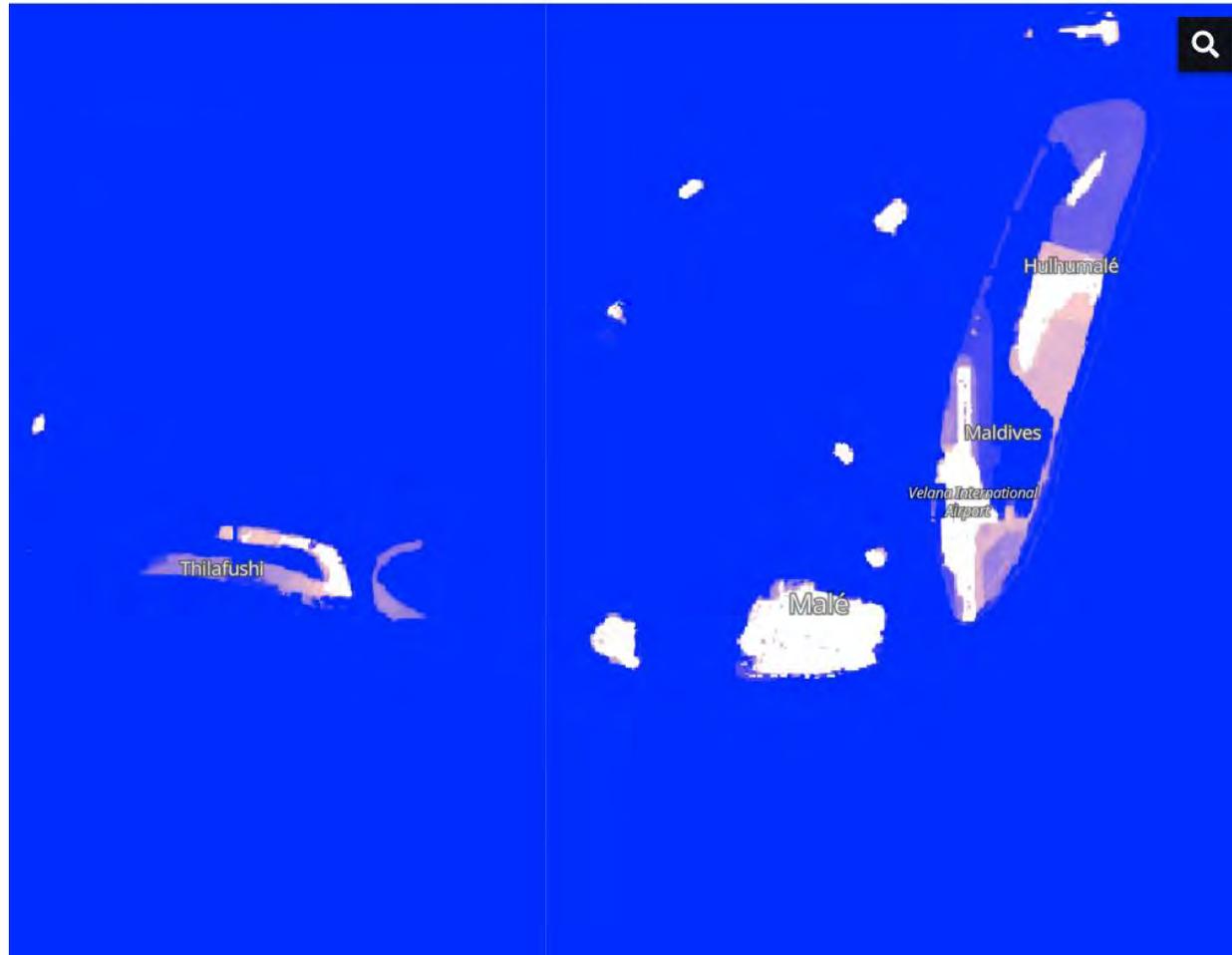
L'apport du spatial : « Les îles victimes du réchauffement climatique : Les Maldives »



Île de Malé



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





Conclusion de la partie 1

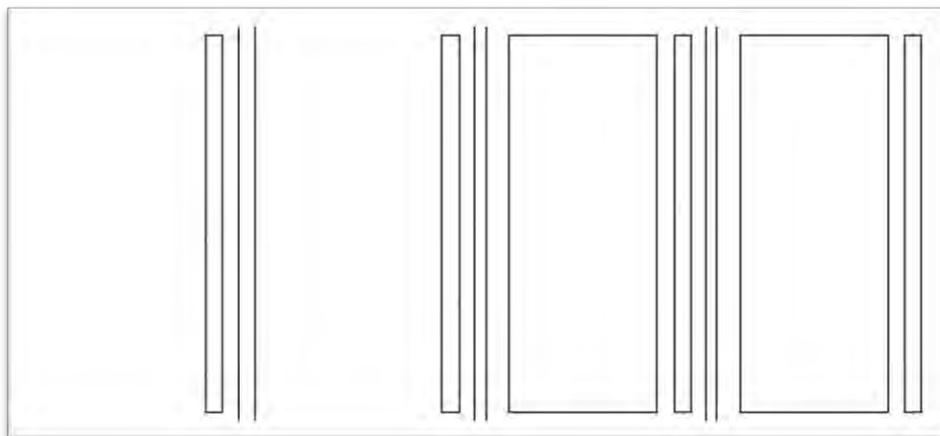
Activité cyclonique et changement climatique





Expérience : Et si on fabriquait un cyclone ?

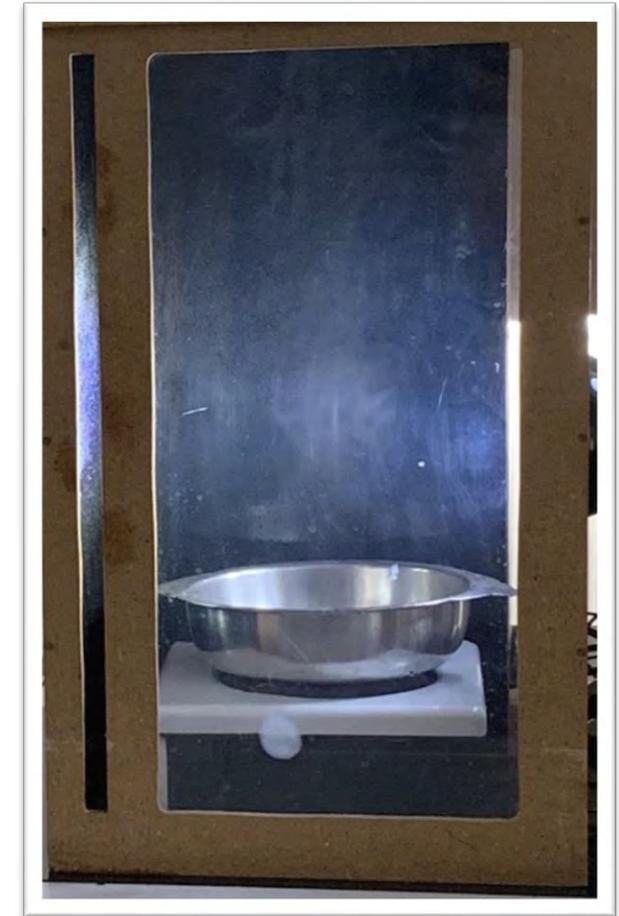
- Le but de notre expérience est de recréer, à petite échelle, un courant d'air ascendant rendu visible par condensation de la vapeur d'eau présente et qui possédera un mouvement de rotation évoquant un cyclone
- Considérons le support de l'expérience : On construit un simulateur aux dimensions 75cm 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.





Expérience : Et si on fabriquait un cyclone ?

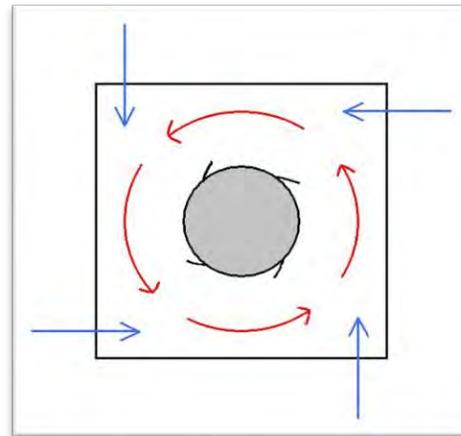
- L'air chaud ascendant est fourni par une plaque chauffante.
- Sa visualisation est rendu possible par l'ajout d'un récipient contenant de l'eau et qui est porté à ébullition: la vapeur d'eau obtenue monte avec la colonne d'air et se condense en rencontrant de l'air froid, ce qui génère l'apparition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





Expérience : Et si on fabriquait un cyclone ?

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

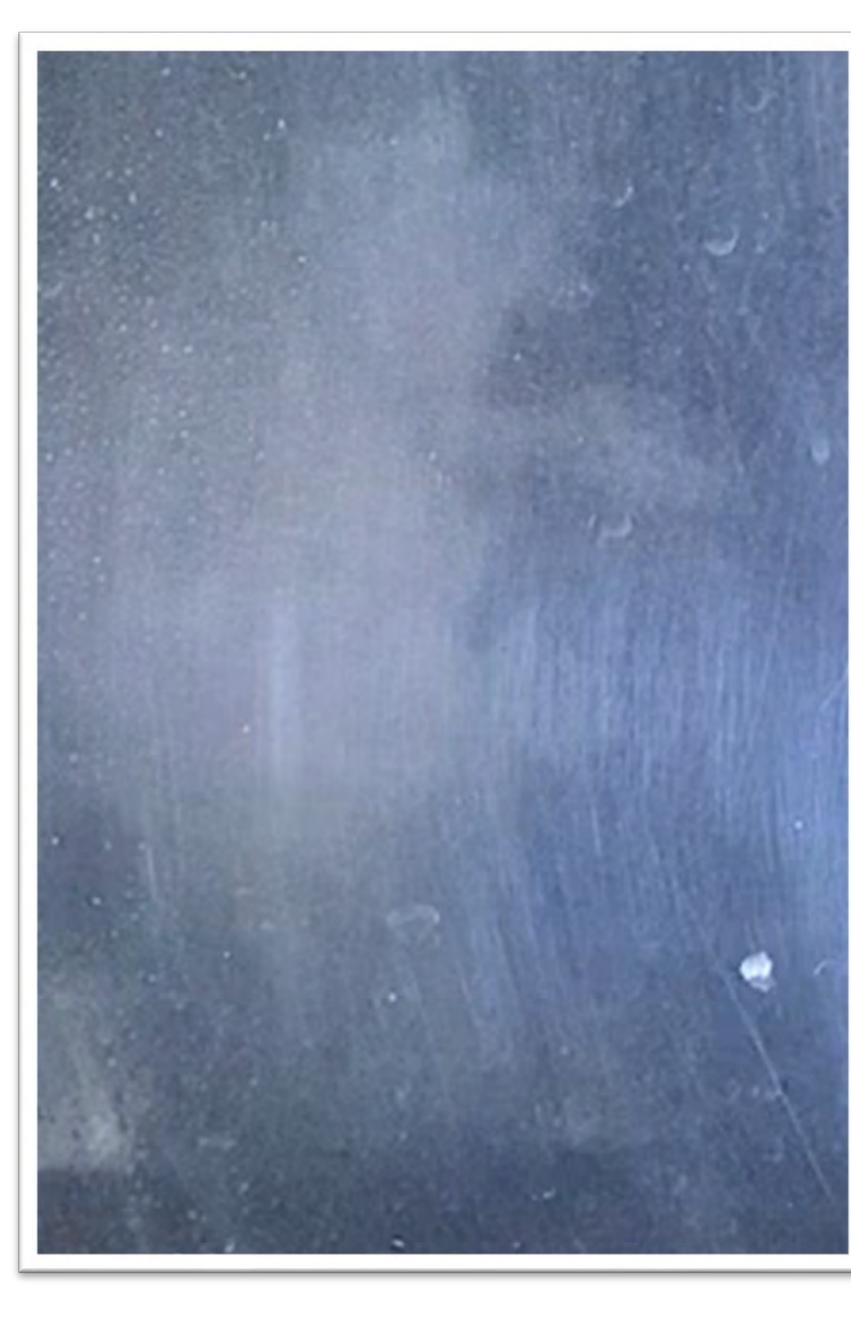




Expérience : Et si on fabriquait un cyclone ?

- 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 !







Expérience : 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





~~→ D'air chaud!~~

Expérience : Confrontation à la situation réelle



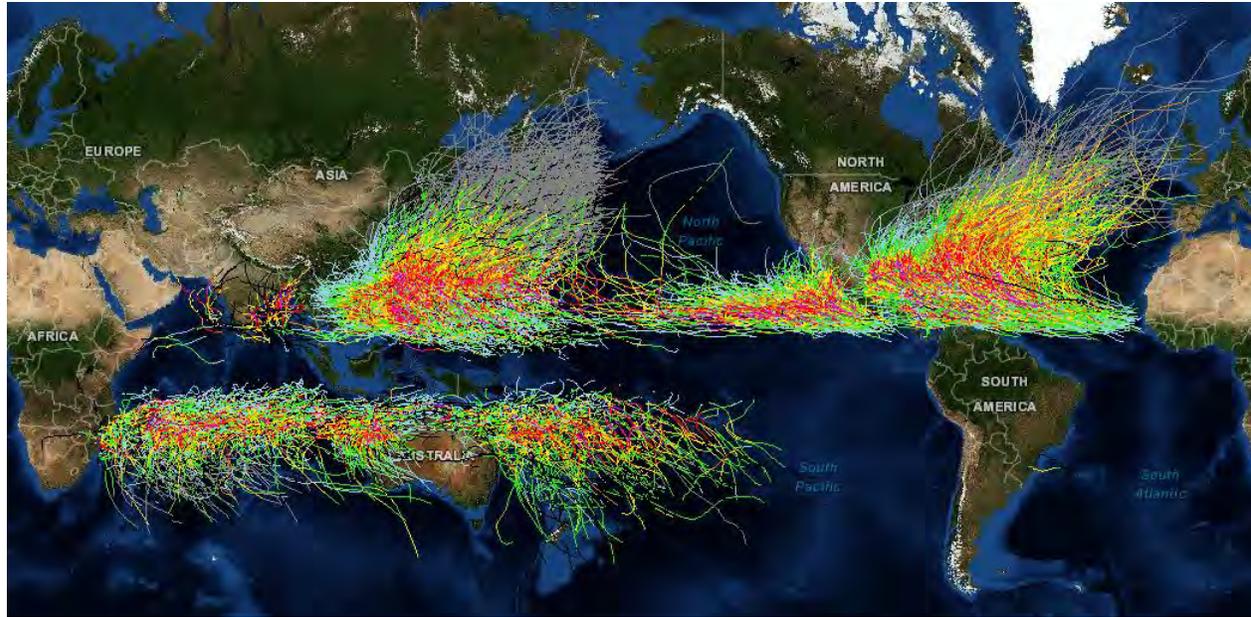
© NASA

Les cyclones sont des phénomènes parfaitement visibles car constitués de nuages (ce qui ne serait pas le cas s'ils ne contenaient que de l'air). L'air chaud ascendant est donc particulièrement riche en vapeur d'eau qui par condensation formera les nuages

→ D'air chaud humide



→ ~~D'air chaud humide!~~ Expérience : Confrontation à la situation réelle



© Domaine public

Les cyclones prennent systématiquement naissance au dessus des océans.

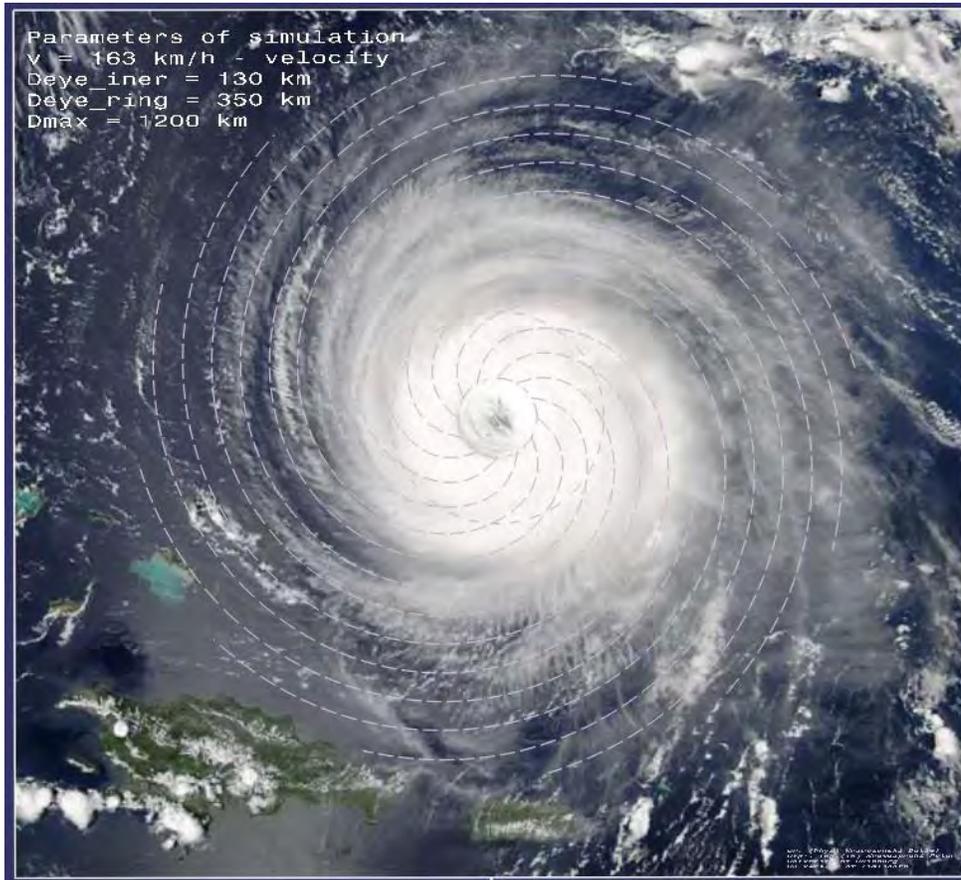
L'étude de leur trajectoire révèle que la force des vents décroît très rapidement si le cyclone atteint le continent

→ D'une zone océanique avec une évaporation intense !



~~→ D'un élément générant le mouvement de rotation~~

Expérience : Confrontation à la situation réelle



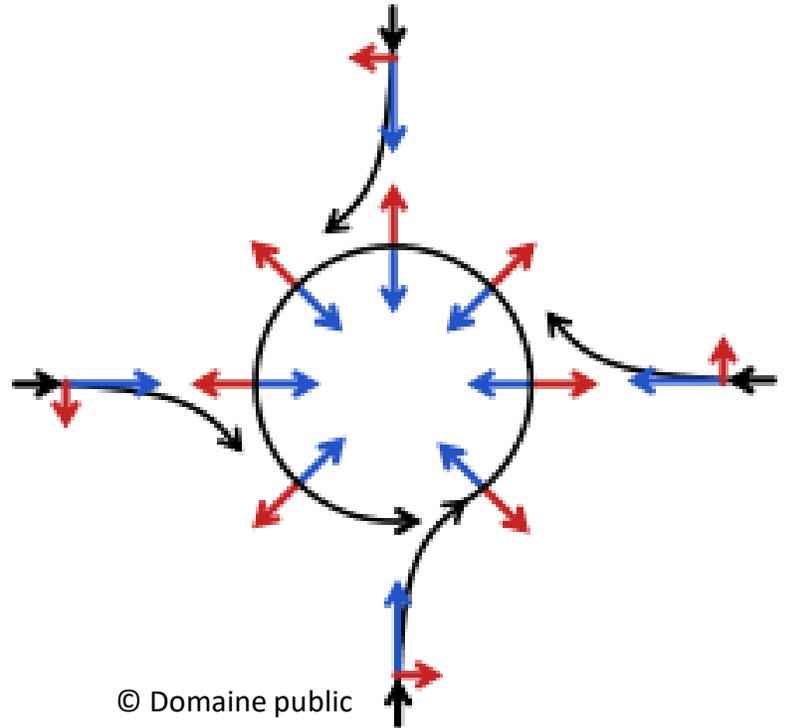
La force de Coriolis est une pseudo-force générée par la rotation terrestre, elle explique le mouvement de rotation des cyclones

→ De la Force de Coriolis

© NASA



~~→ De la Force de Coriolis~~ Expérience : Confrontation à la situation réelle



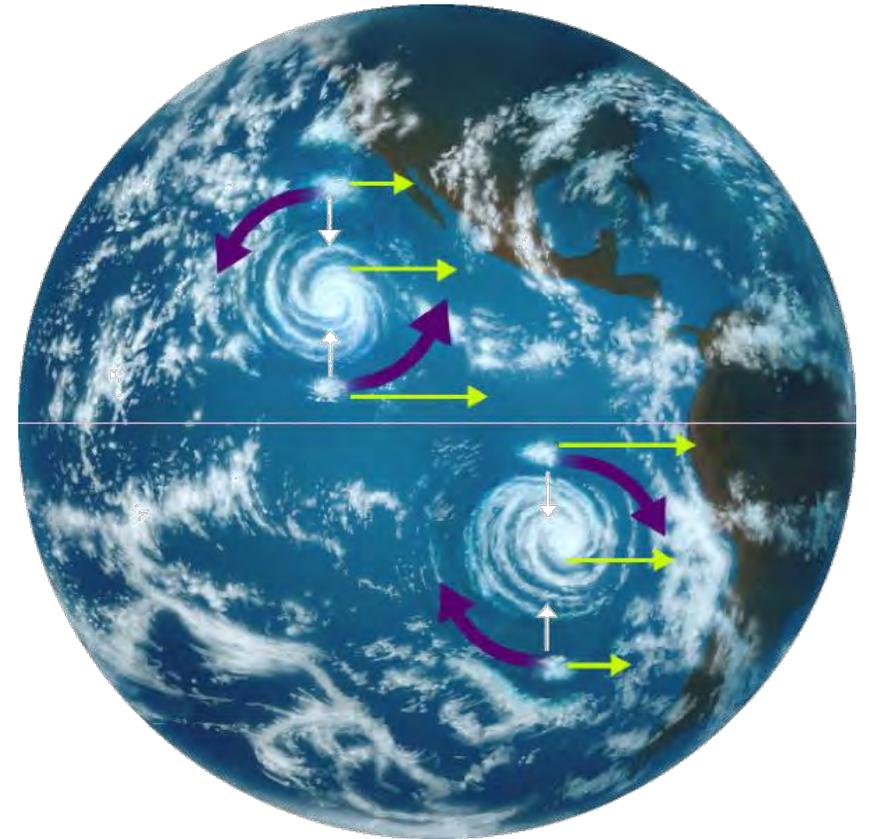
La force de Coriolis est nulle à l' équateur

→ De ne pas se situer au niveau de l'équateur



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

D'une zone d'évaporation intense de l'océan qui n'est pas à l'équateur !



https://www.nap.edu/html/oneuniverse/motion_32-33.html



Le changement climatique peut-il influencer la formation d'un cyclone ?

Hypothèse : La formation des cyclones est favorisée par l'existence de zones océaniques 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 !



Pour aller plus loin : la « puissance 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

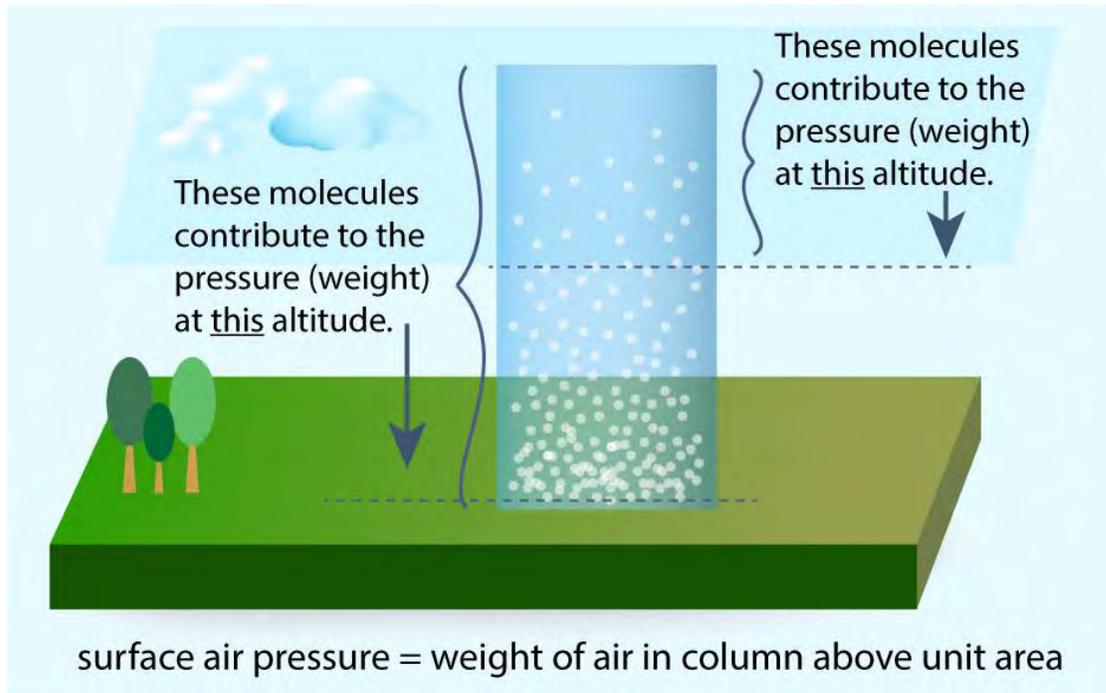
On s'appuie sur l'observation suivante au sein du modèle :

→ L'air chaud moins dense 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 bas du dispositif au fur et à mesure que l'on chauffe celui-ci
- Proposition : Dans la zone de formation d'un cyclone, le nombre de molécule d'air diminue



~~→ Dans la zone de formation d'un cyclone, le nombre de molécule d'air diminue~~



© liberaldictionary.com

Expérience : Information complémentaire

La Pression atmosphérique est la force exercée par le poids des molécules d'air sur une surface donnée

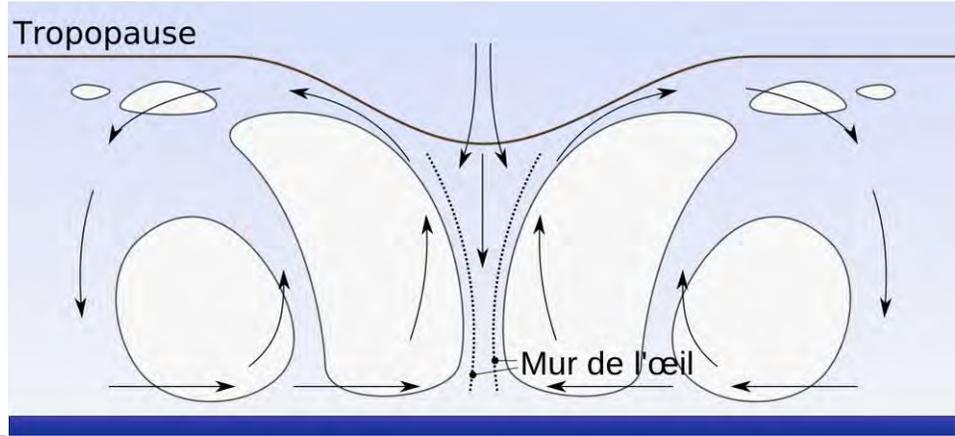
Si le nombre de molécule d'air diminue, la pression atmosphérique également

~~→ Dans la zone de formation d'un cyclone, la pression atmosphérique diminue au bas de la colonne d'air~~

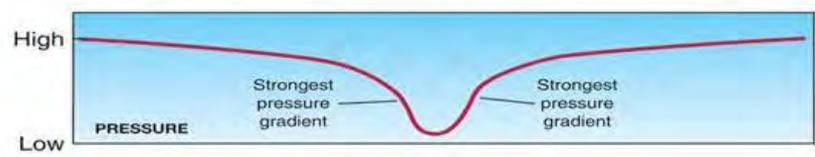
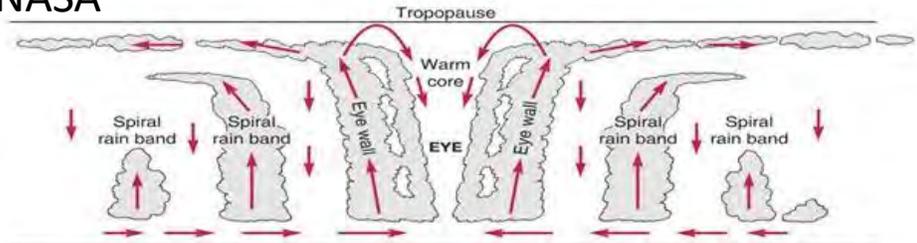


~~→ Dans la zone de formation d'un cyclone, la pression atmosphérique diminue~~

Expérience : Confrontation à la situation réelle



© NASA



Au sein d'un cyclone le courant ascendant principal est situé au centre dans une zone appelée œil du cyclone

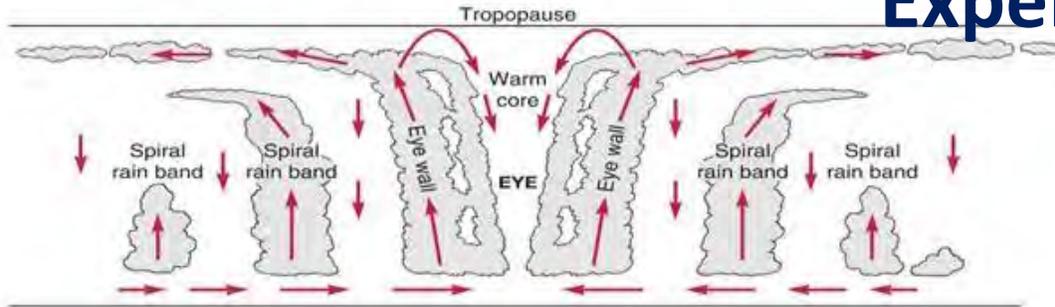
L'air ascendant est évacué latéralement en altitude, et retombe ensuite générant des courants descendants et des zones avec plus d'air et donc de plus hautes pressions

De l'air d'altitude vient partiellement combler au sein de l'œil le 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



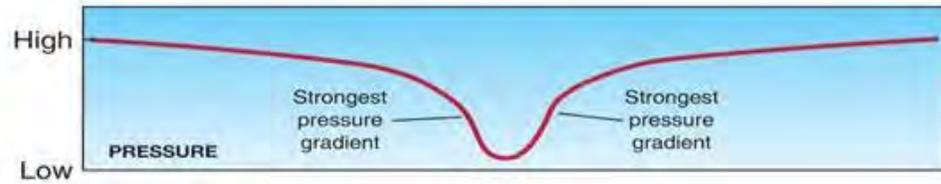
Expérience : Information complémentaire



(a)



(b)



(c)



(d)

Copyright © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

Les mouvements ascendants et descendants structurent le cyclone

On observe une corrélation entre la vitesse des vents observée au sein du cyclone et les variations horizontales de la pression



~~→ 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~~

Expérience : Information complémentaire

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)

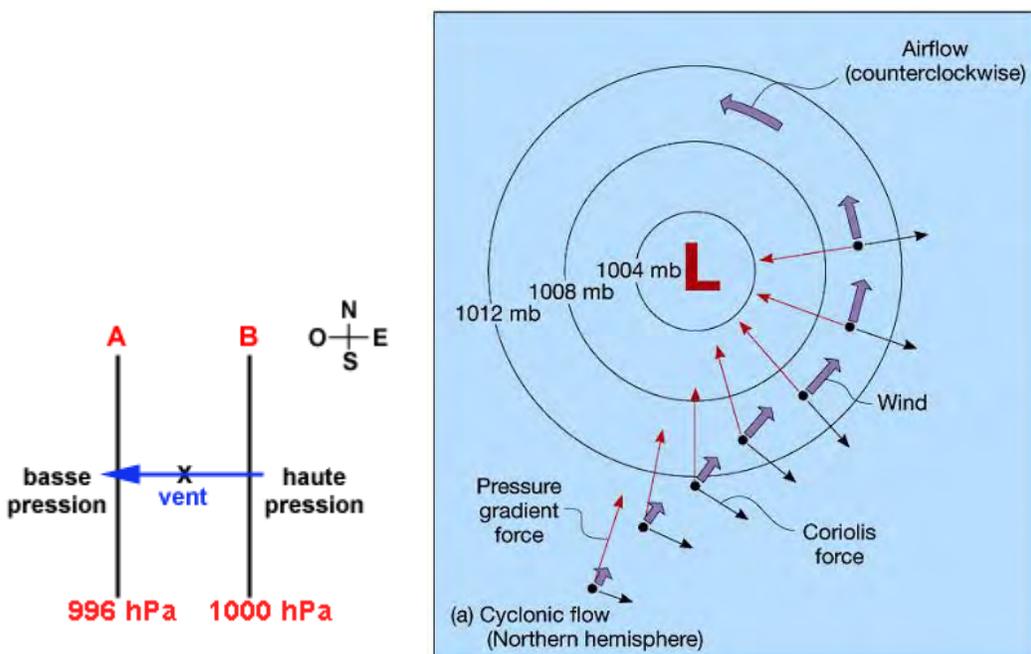
Ce flux d'air c'est le vent !

Dans un cyclone, on observe un important gradient de pression à l'origine des vents associés au cyclone

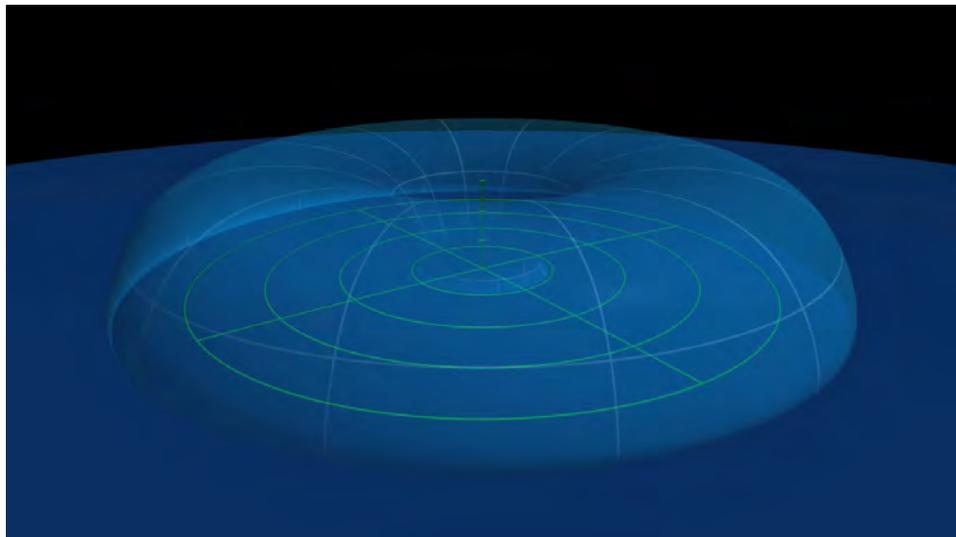
Le flux d'air est centripète mais il est soumis à la force de Coriolis qui dévie son mouvement vers la droite dans l'hémisphère nord

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~~



in The Atmosphere, 8th edition, Lutgens and Tarbuck, 8th edition, 2001.

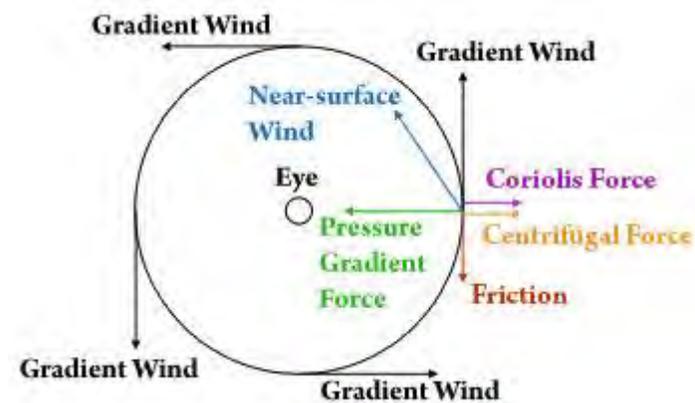


Expérience : Information complémentaire

La vitesse des vents est relié au gradient de pression

Plus le gradient est élevé, plus la vitesse des vents augmente

Catégorie de cyclone	Pression au centre (mbar)	Vitesse des vents (km/h)	Dégâts
1	>980	119-153	minimum
2	965-979	154-177	modérés
3	945-964	178-209	étendus
4	920-944	210-250	extrêmes
5	<920	>250	catastrophique



© C. Knowlton, University of Rhode Island



Le changement climatique peut-il influencer la puissance d'un 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 des vents plus importants

→ Le changement climatique entraîne la formation de cyclones plus puissants !



Changement climatique et cyclone

- 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 permettant le déplacement et 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



Une hypothèse ? Une prédiction ? Une réalité ?

- Le raisonnement suivi dans la démarche paraît assez robuste mais il n'intègre pas de nombreux éléments.
- Il a été régulièrement proposé par certains scientifiques et repris dans l'opinion public
- 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

→ Allons faire un tour en en 2005 !!!!



Relier l'activité cyclonique et le réchauffement climatique : l'exemple Katrina

- On 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 suivie l'année 2005 aux USA et qui s'était traduite par la multiplicité des événements cycloniques avec en point d'orgue le cyclone Katrina.



© nola.com



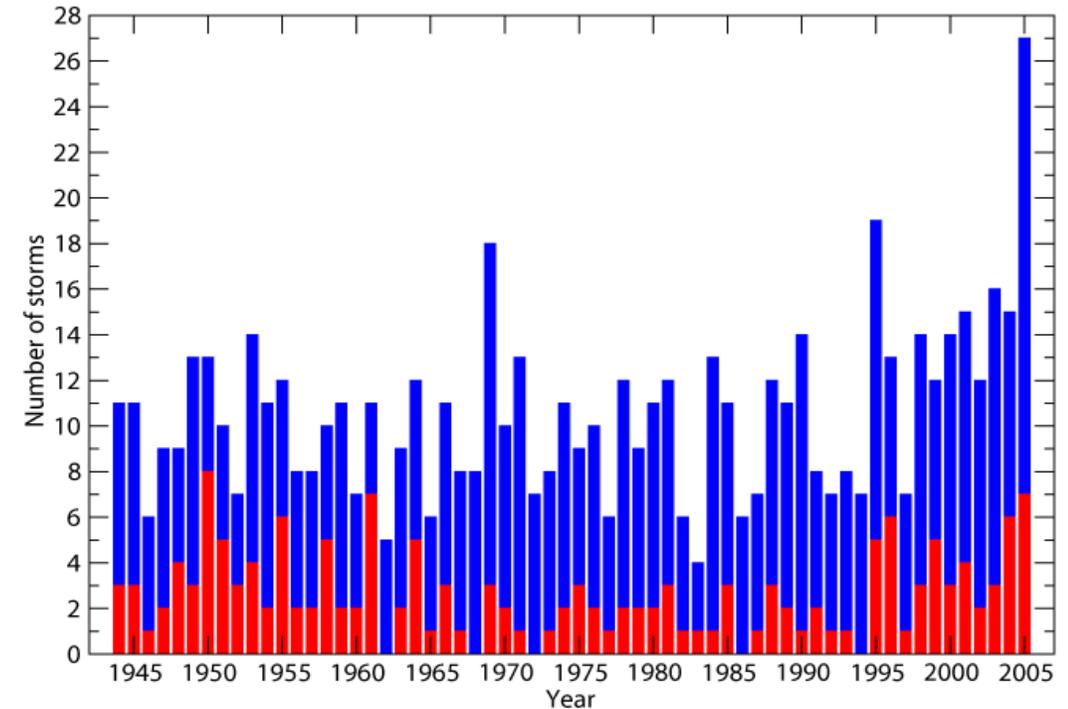
1. Une année cyclonique exceptionnelle : 2005

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
Atlantic, 1944-2005



NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Tropical Cyclones for Annual 2005, published online January 2006, retrieved on July 7, 2021 from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/tropical-cyclones/200513>.



1. Une année cyclonique exceptionnelle : 2005

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'évènements 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



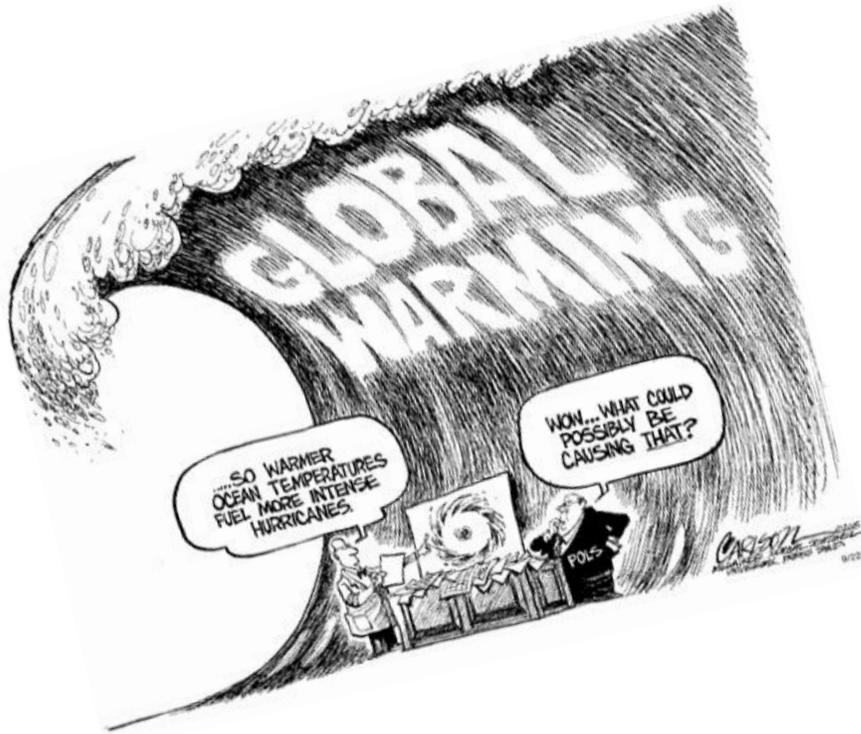
Les deux vidéos montrent les conséquences dévastatrices du passage du cyclone Katrina sur la Louisiane et le traumatisme qu'il va constituer pour la population américaine



3. Le réchauffement climatique et Katrina

Hurricane Katrina's real name

By Ross Gelbspan. New York times Aug, 31 2005



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

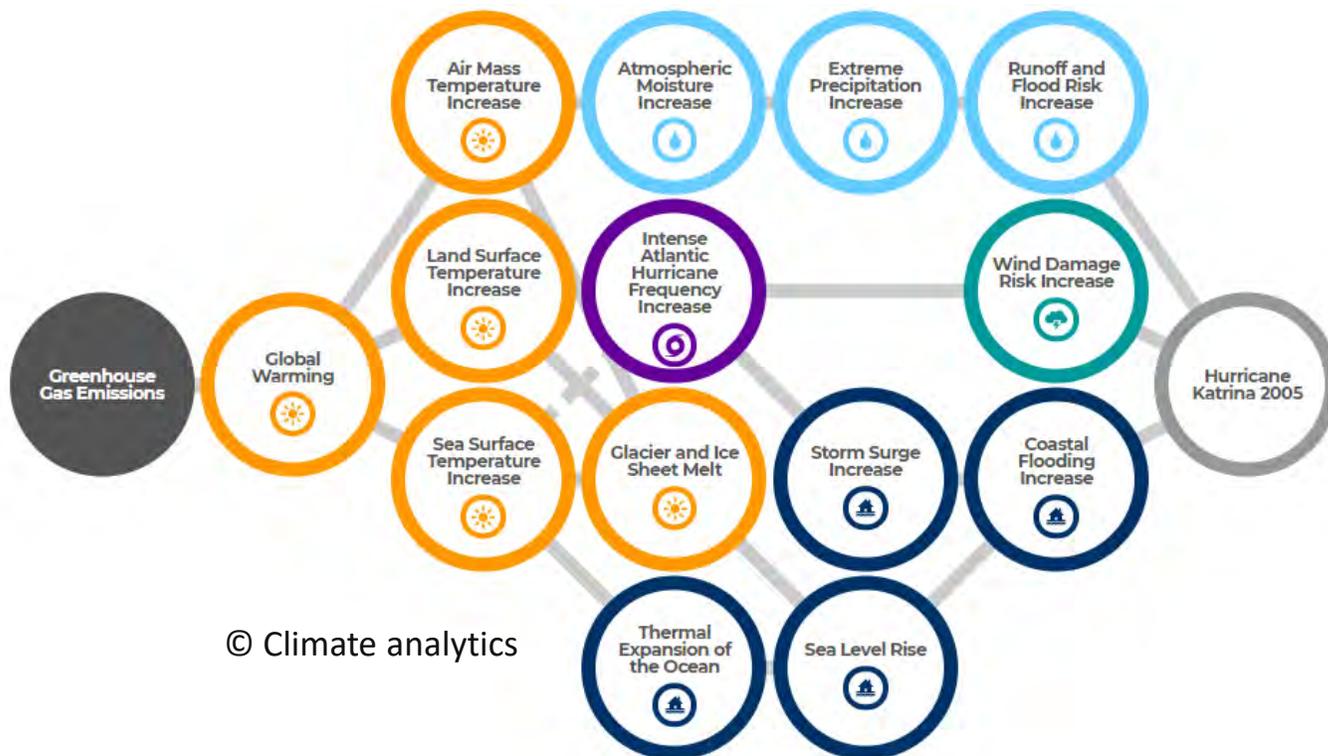
When the American press has bothered to cover global warming, it has focused almost exclusively on its political and diplomatic aspects and not on what the warming is doing to agriculture, water supplies, plant and animal life, public health and weather.

 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.



3. Le réchauffement climatique et Katrina





3. Le réchauffement climatique et Katrina

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 relation théorique et prédit son intensification à venir





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

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.

*"A hundred years ago, Upton Sinclair wrote, "It is difficult to get a man to understand something when his salary depends upon his 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."***

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^e 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 ?



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

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 conduit 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



September 8, 2005

"Under the rock"

J.D. Crowe, Mobile Register



Analyse critique : Un raisonnement simple... et juste ?

"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.



- Le changement climatique favorise la formation des cyclones !
- Le changement climatique entraîne la formation de cyclones plus puissant !





Activité pédagogique

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.

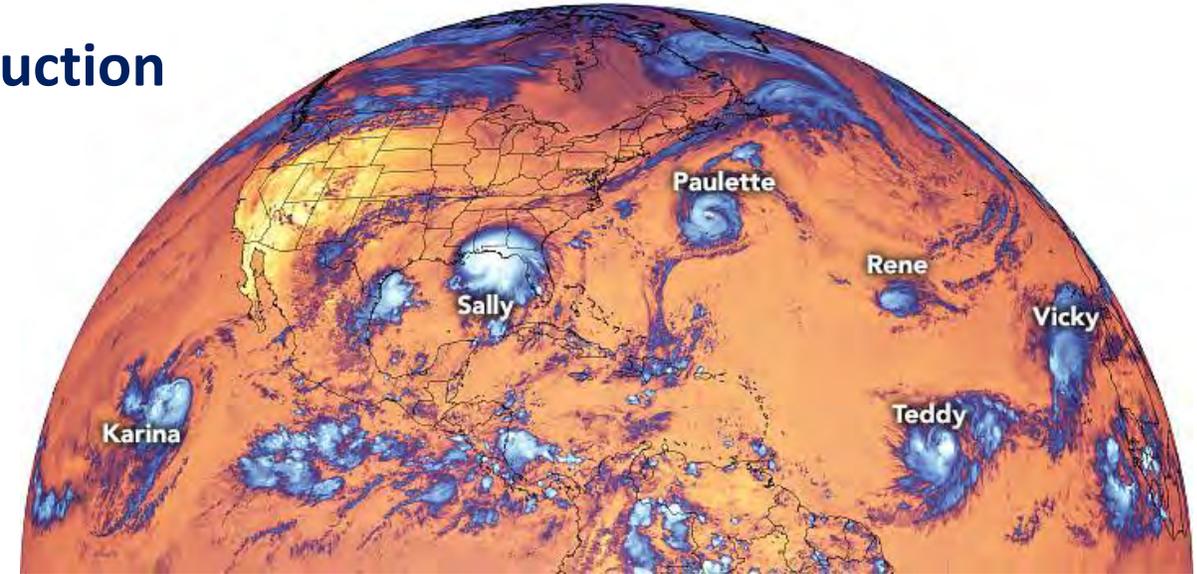
On se propose ici de traiter les deux points suivants :

- Expliquer pourquoi il existe encore autant d'incertitude sur l'évolution future de l'activité cyclonique
- Montrer que la pertinence des modèles prédictifs sur l'évolution de cette activité cyclonique bénéficiera très largement des technologies spatiales



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.



© NASA

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

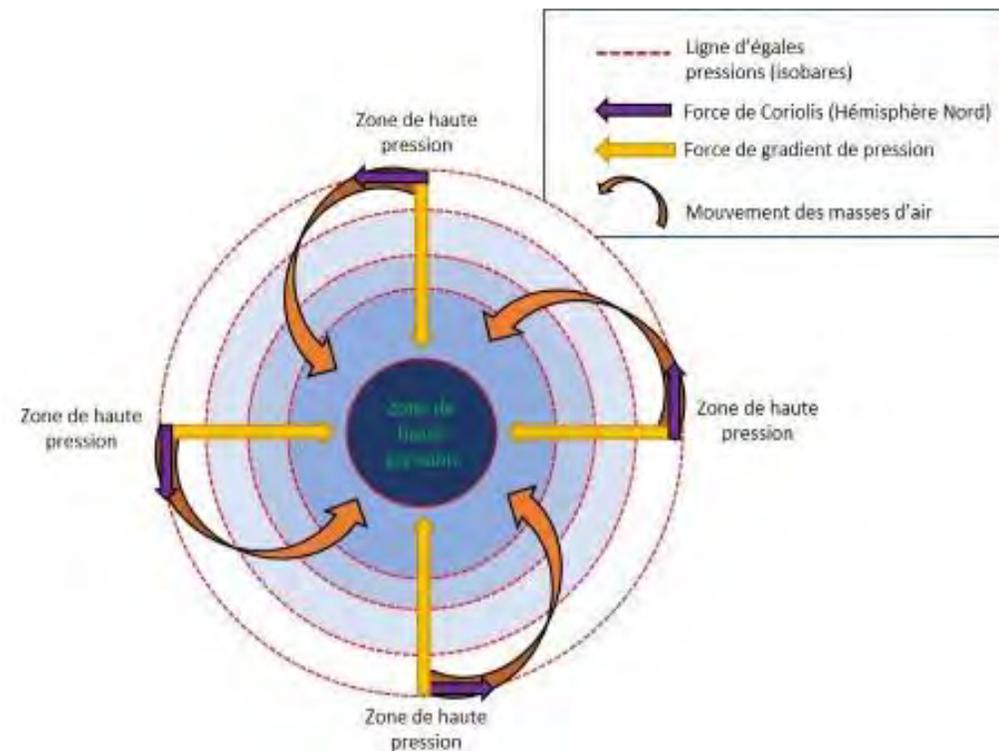
Un cyclone naît et se développe uniquement si les conditions suivantes sont réunies :

- 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 ».



Informations nouvelles



Document 1 : Commentaires

La connaissance des processus présidant à la formation des cyclones est indispensable pour prédire l'évolution future de l'activité cyclonique.

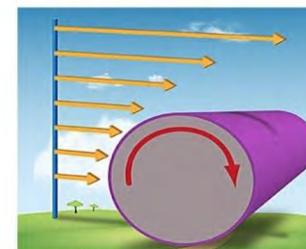
Si la condition thermique mis en évidence par l'expérimentation est réelle, d'autres facteurs semblent importants à considérer en particulier l'importance de l'humidité dans la cyclogenèse et le rôle de la structuration des vents dans la pérennité du phénomène



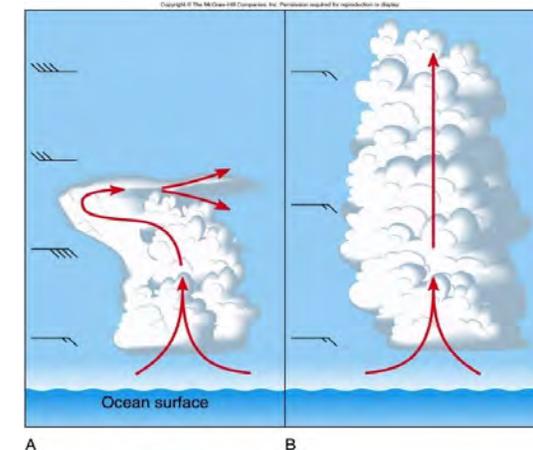
Directional Shear



Speed Shear



Credit: NOAA





Document 2 : Les cyclones de l'année 2020

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).

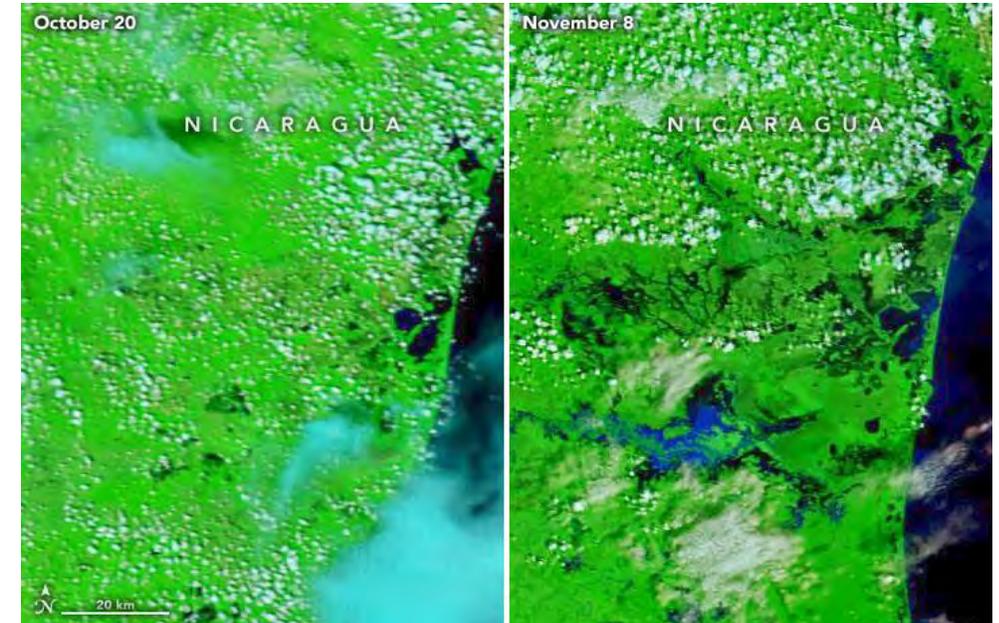
Nom	Catégorie	Mois	Vitesse maximale (Km/H)	Pression minimale (HPa)
Arthur	TS	5	95	990
Bertha	TS	5	85	1005
Cristobal	TS	6	95	988
Dolly	TS	6	75	1000
Edouard	TS	7	75	1007
Fay	TS	7	95	998
Gonzalo	TS	7	100	997
Hanna	H1	7	150	973
Isaias	H1	7	140	987
Ten	Tropical depression	7	55	1008
Josephine	TS	8	75	1004
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 2 : Commentaires

- 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 (ou leur localisation) de ces phénomènes et la crise sanitaire mondiale

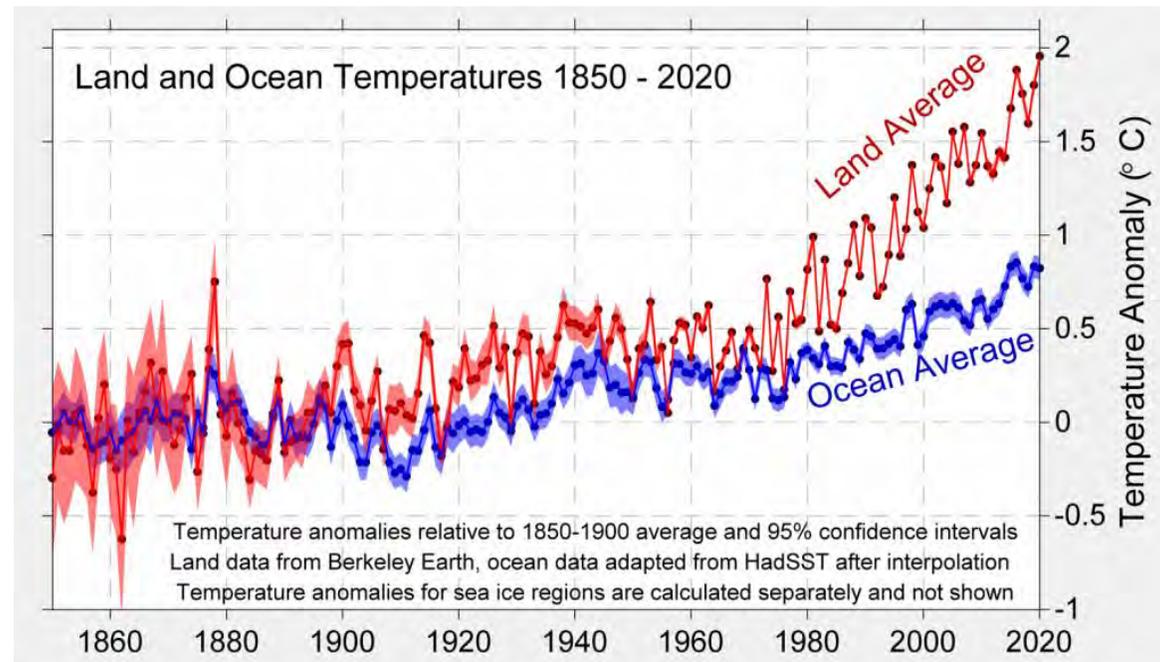
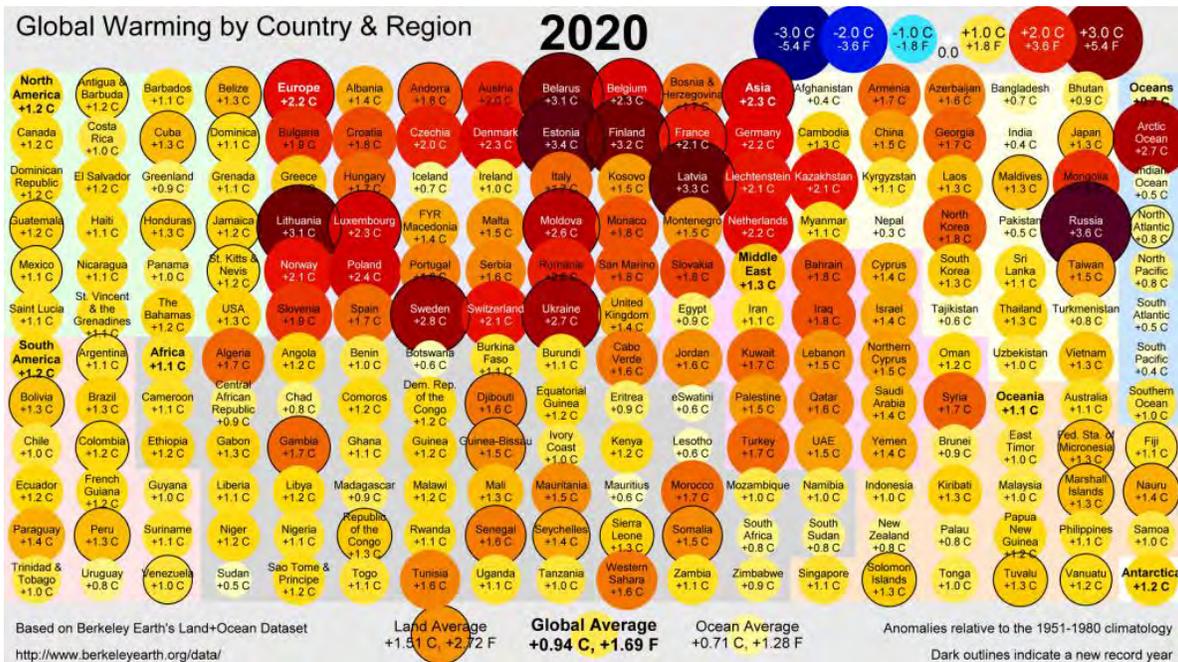
© NASA



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



Document 3 : Réchauffement climatique et réchauffement des océans

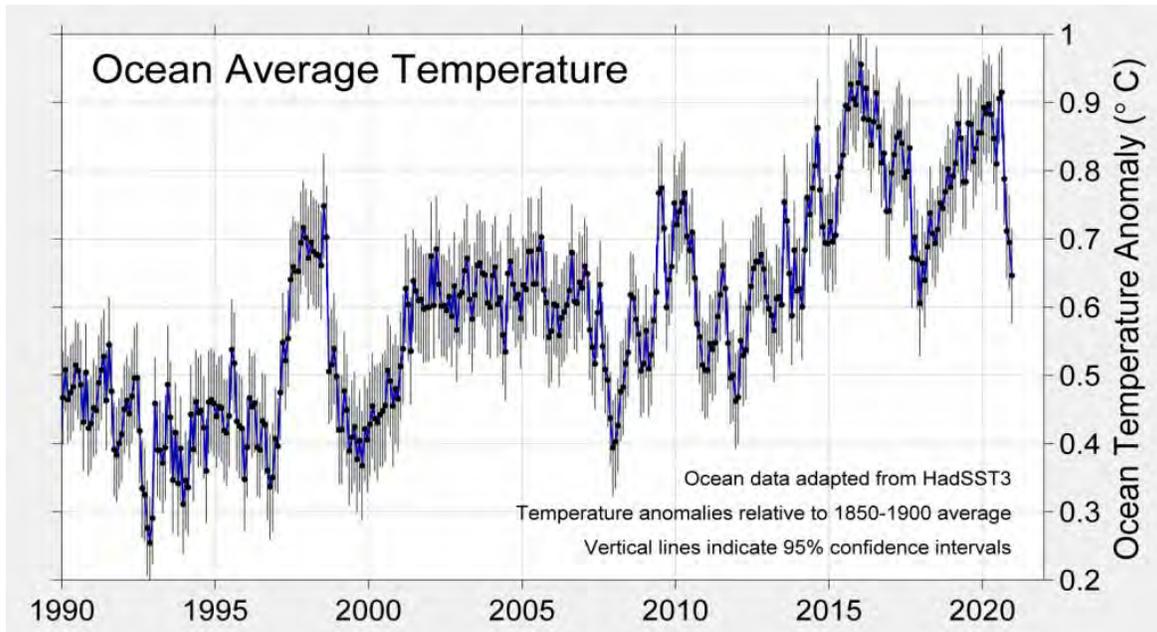


<http://berkeleyearth.org/>

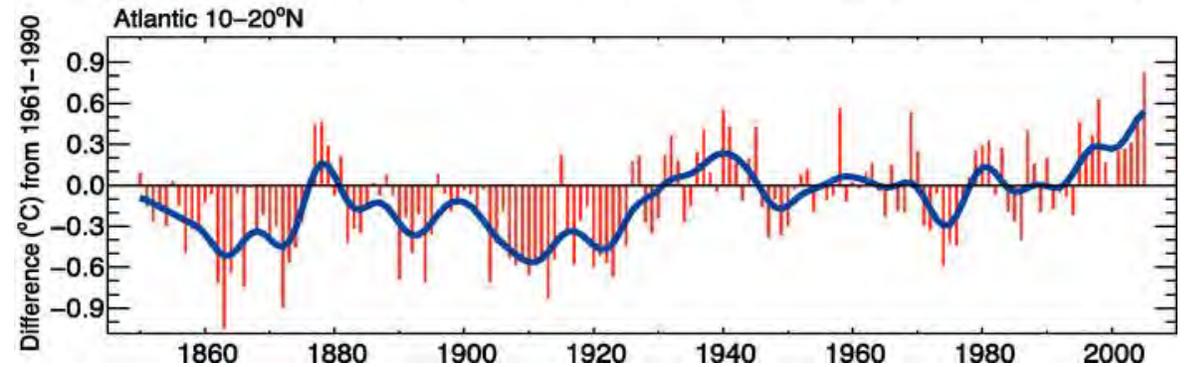
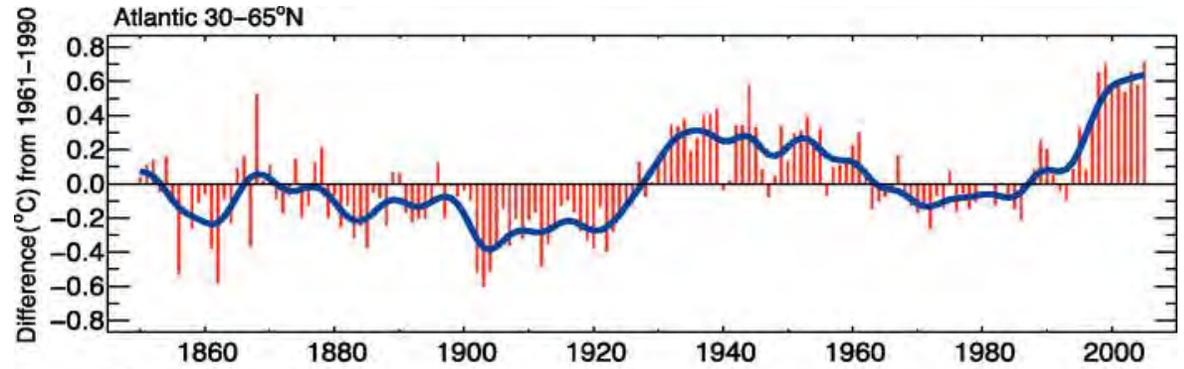
<http://berkeleyearth.org/>



Document 3 : Réchauffement climatique et réchauffement des océans



<http://berkeleyearth.org/>



© Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)



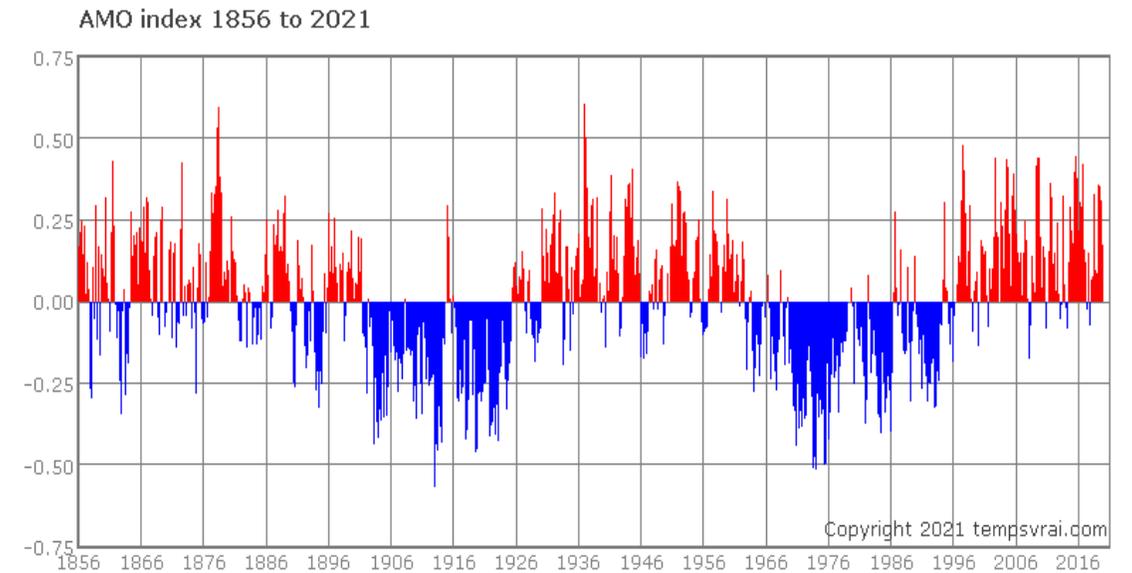
Document 3 : Commentaires

- 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

- 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)



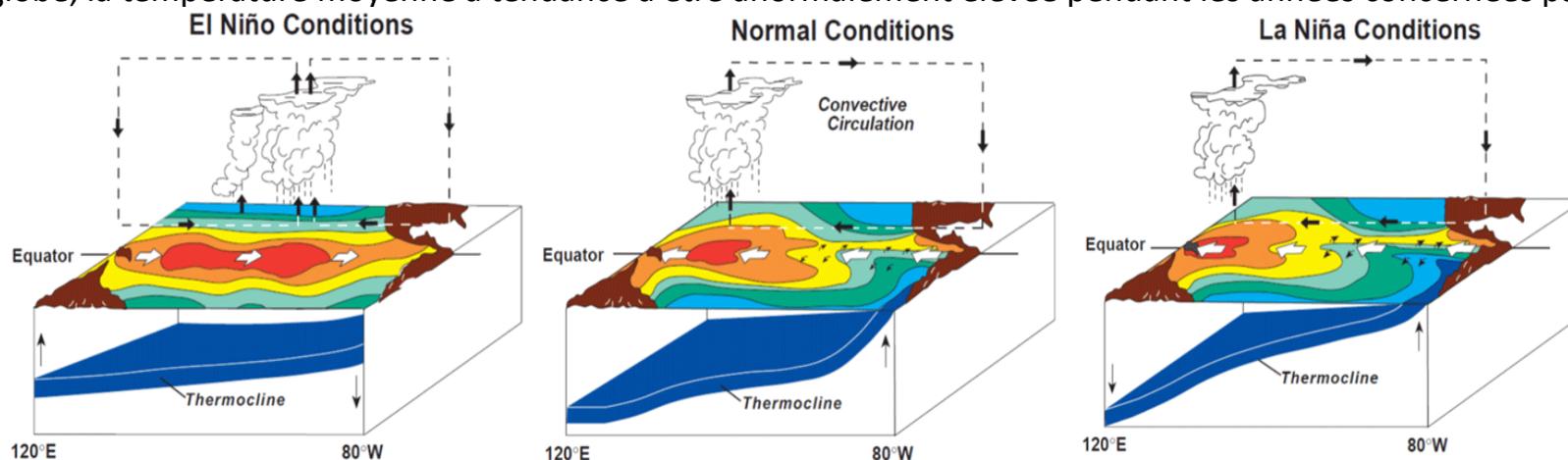


Document 4 : Phénomènes climatiques et évolution de la température des océans

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 descendance 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



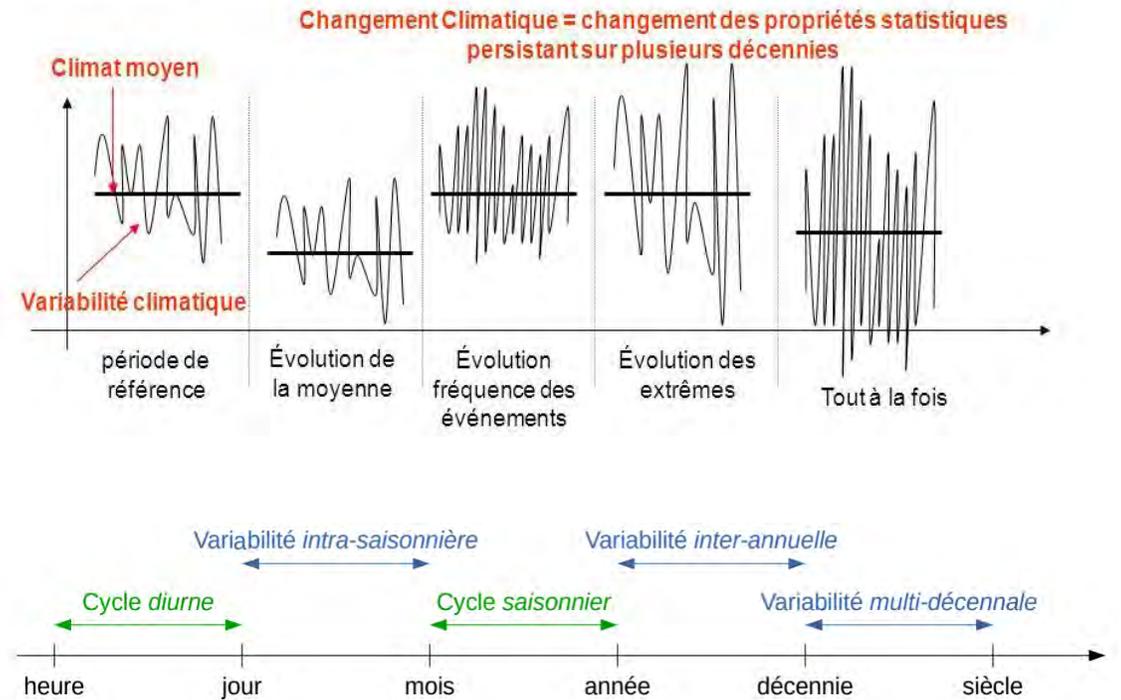
S. Philander Published 1985 Geography, Geology Journal of the Atmospheric Sciences



Document 4 : Commentaires

- 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

Différence entre variabilité et changement climatique

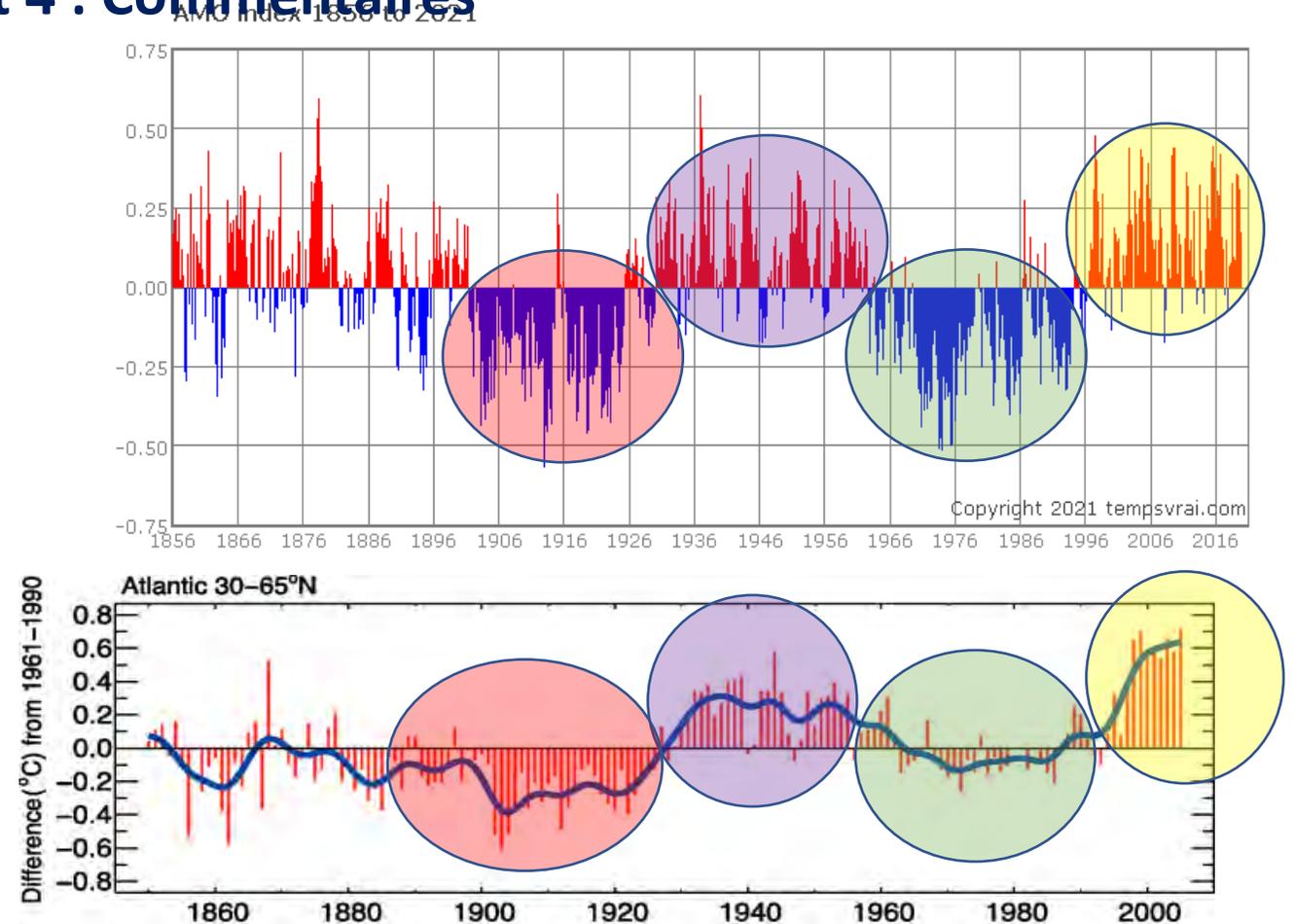


N.B. Les cycles diurne et saisonnier (variations énergétiques) ne sont pas de la variabilité interne.



Document 4 : Commentaires

- 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 lié à une phase AMO + et le réchauffement climatique



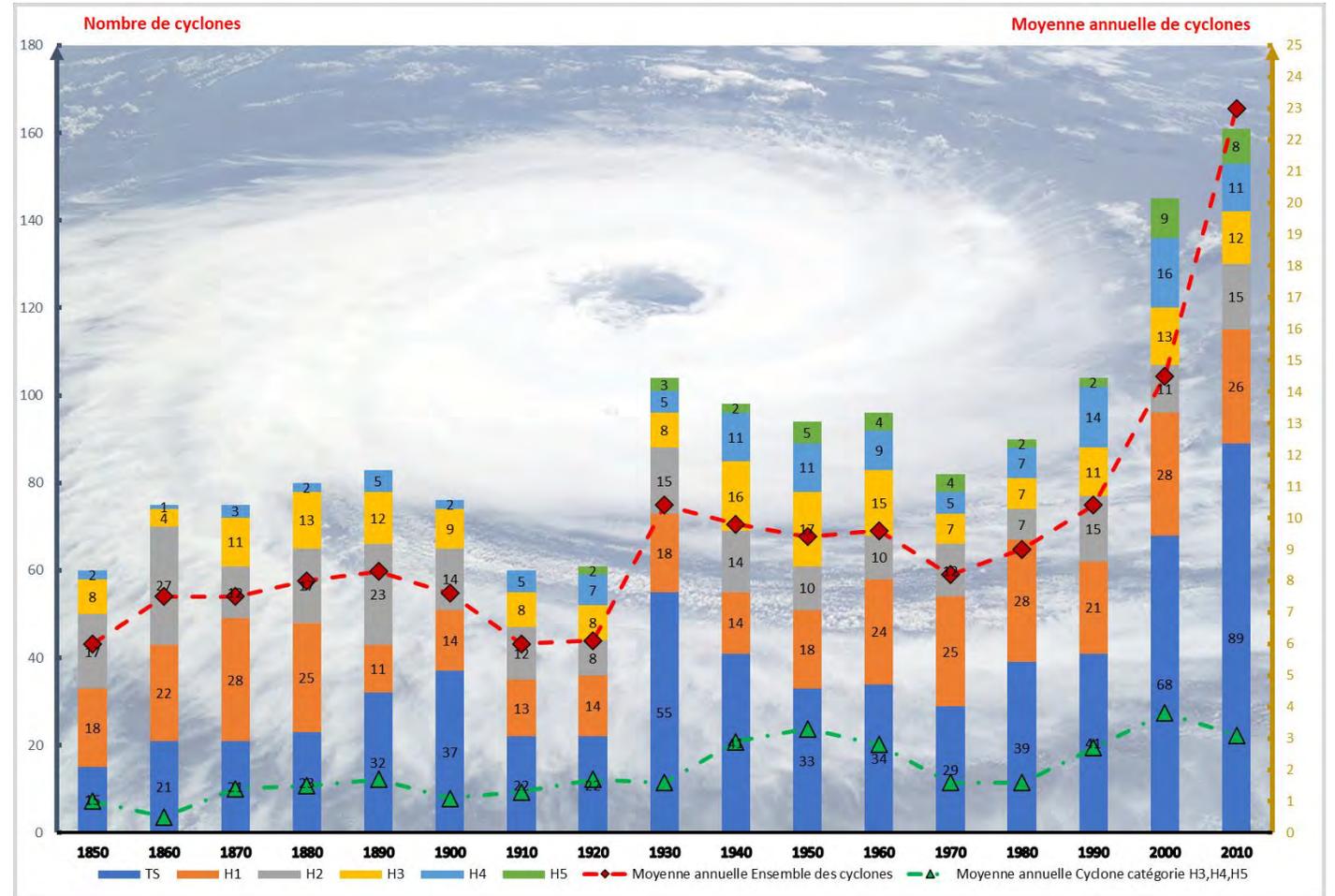


Document 5 : Statistiques sur les cyclones dans l'Atlantique

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

Informations complémentaires

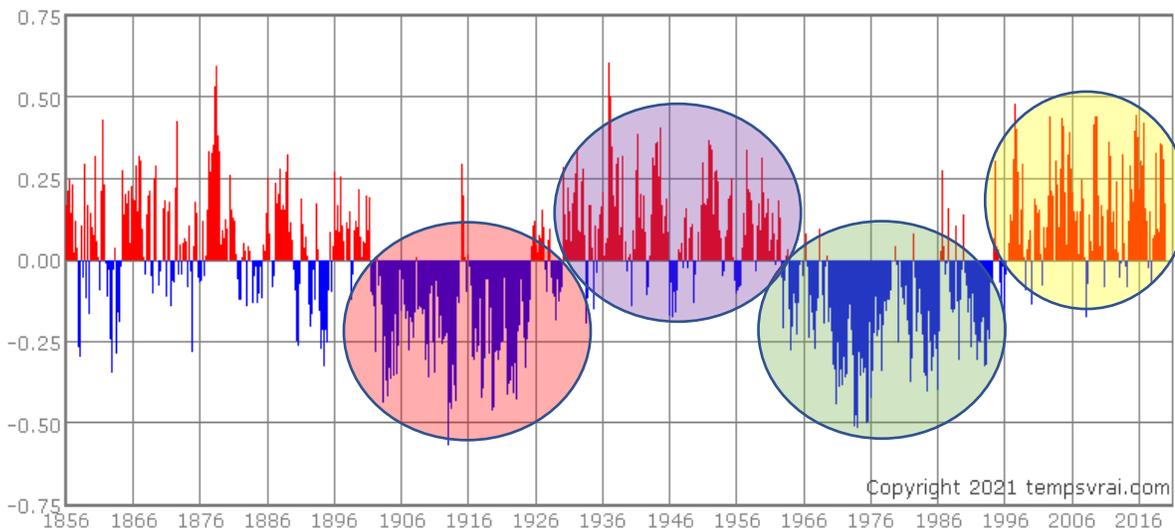
- Ces graphiques ont été élaborés à partir d'une base de données des services météorologiques américains, le N.H.C. de Miami depuis 1886. Cette base de données de plus de 130 ans, a fait l'objet d'un traitement spécifique, à la fois numérique et graphique. Bien entendu, avant l'avènement des satellites 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.



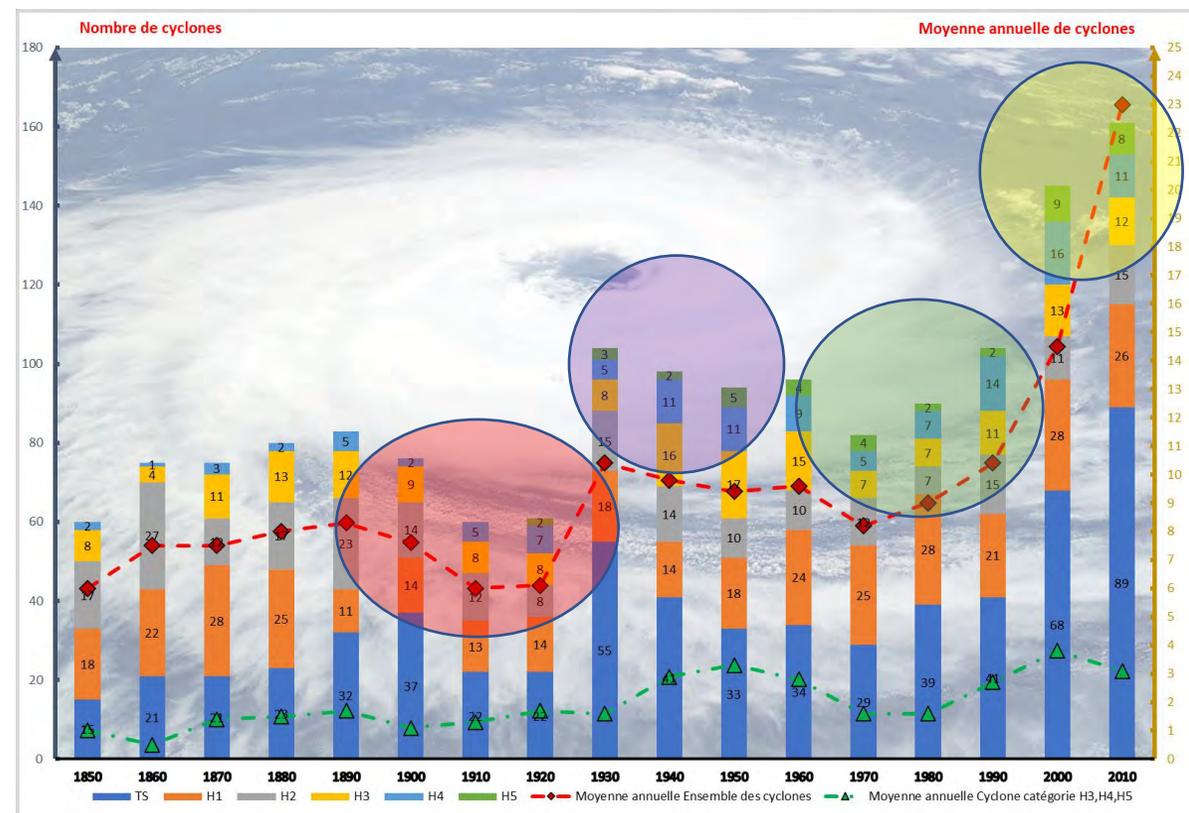
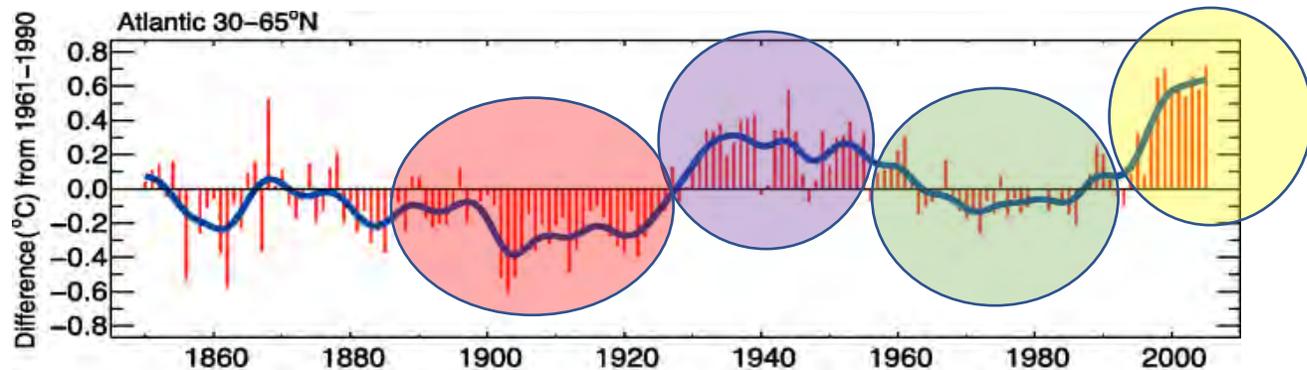


Document 5 : Commentaires

AMO index 1856 to 2021



Atlantic 30-65°N

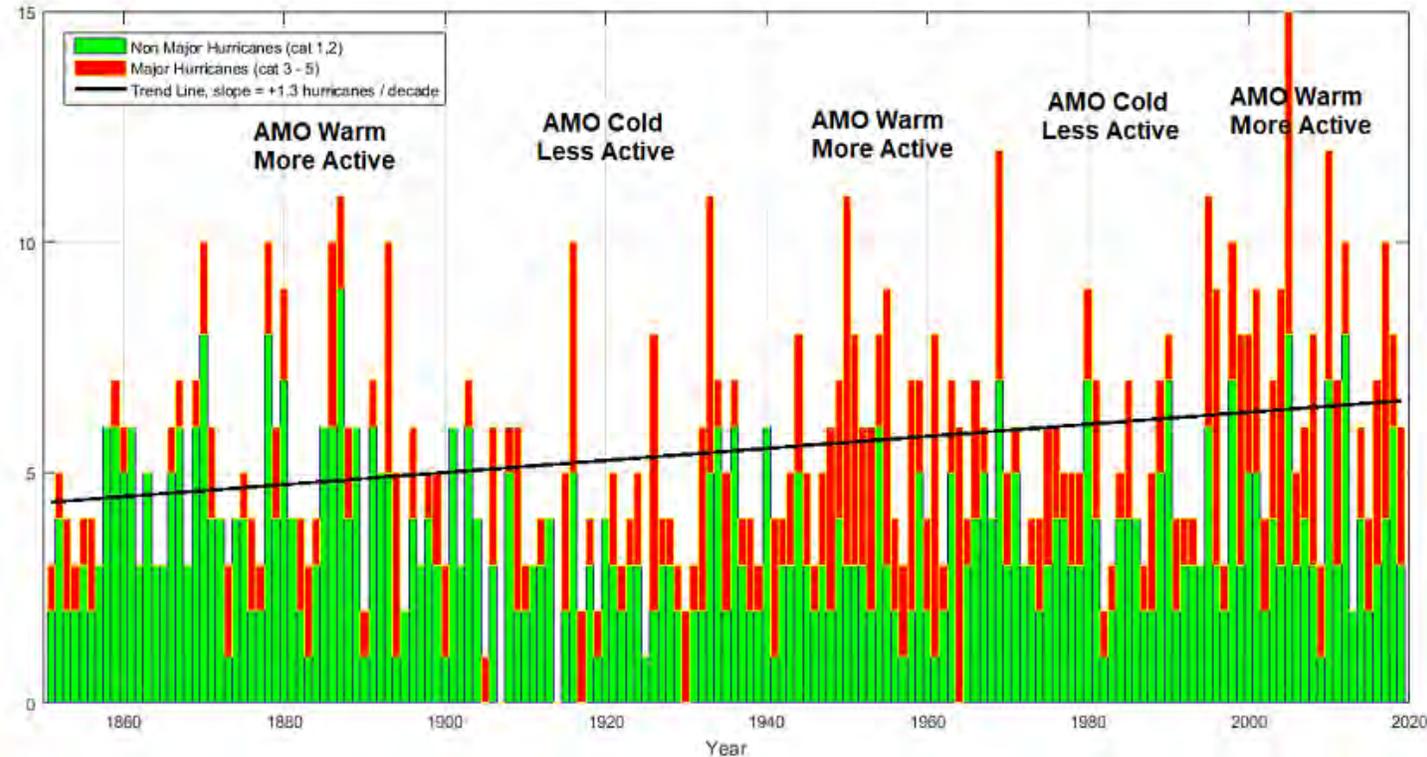




Document 5 : Commentaires

<http://www.atmo.arizona.edu/>

- 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'exclue cependant pas une tendance haussière associée au changement climatique



Le nombre d'ouragans dans le bassin atlantique chaque année de 1851 à 2019. Les barres vertes indiquent le nombre d'ouragans non majeurs (catégories 1 et 2) chaque année, et les barres rouges indiquent le nombre d'ouragans majeurs (catégorie 3 et supérieure) chaque année. Ceux-ci sont ajoutés pour obtenir le nombre total d'ouragans chaque année. La ligne noire montre la tendance linéaire du nombre total d'ouragans dans l'Atlantique de 1851 à 2019.

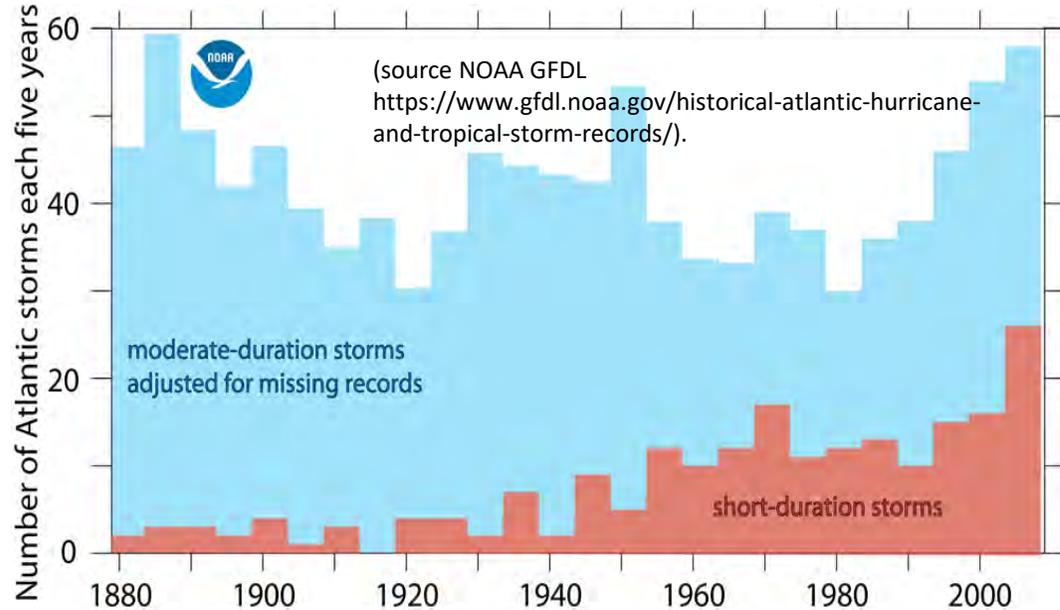


Document 5 : Commentaires : Une difficile approche statistique

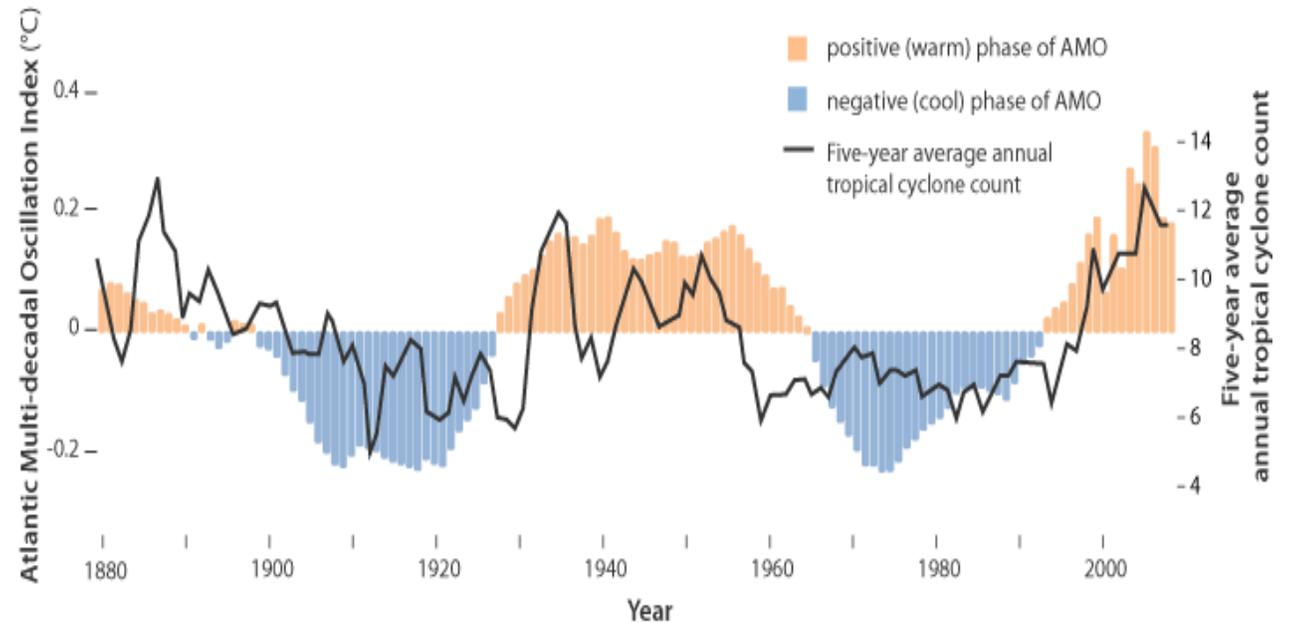
- Les climatologues disposent d'observations sur les cyclones tropicaux depuis la fin du XIXe siècle, surtout sur l'Atlantique.
- Cependant, la densité du trafic maritime en l'Atlantique était relativement faible au cours des premières décennies de cette période, de sorte qu'un nombre important de tempêtes 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.



Document 5 : Commentaires : Une difficile approche statistique



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.



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



Document 6 : Cisaillement des vents et cyclones

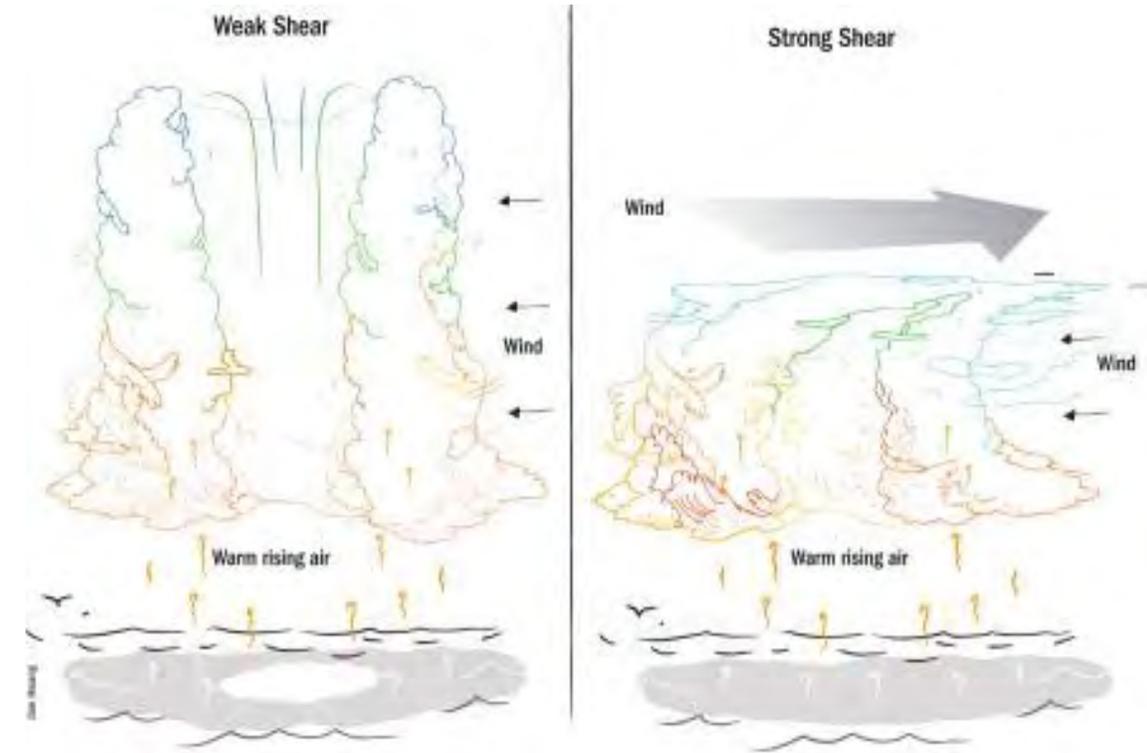
Les variations de la direction et de la vitesse du vent ne sont pas systématiquement lentes et continues à l'échelle verticale : il peut en effet se produire des changements notables et dans la répartition spatiale des déplacements de l'air, qui parfois prennent même la forme d'une discontinuité

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.

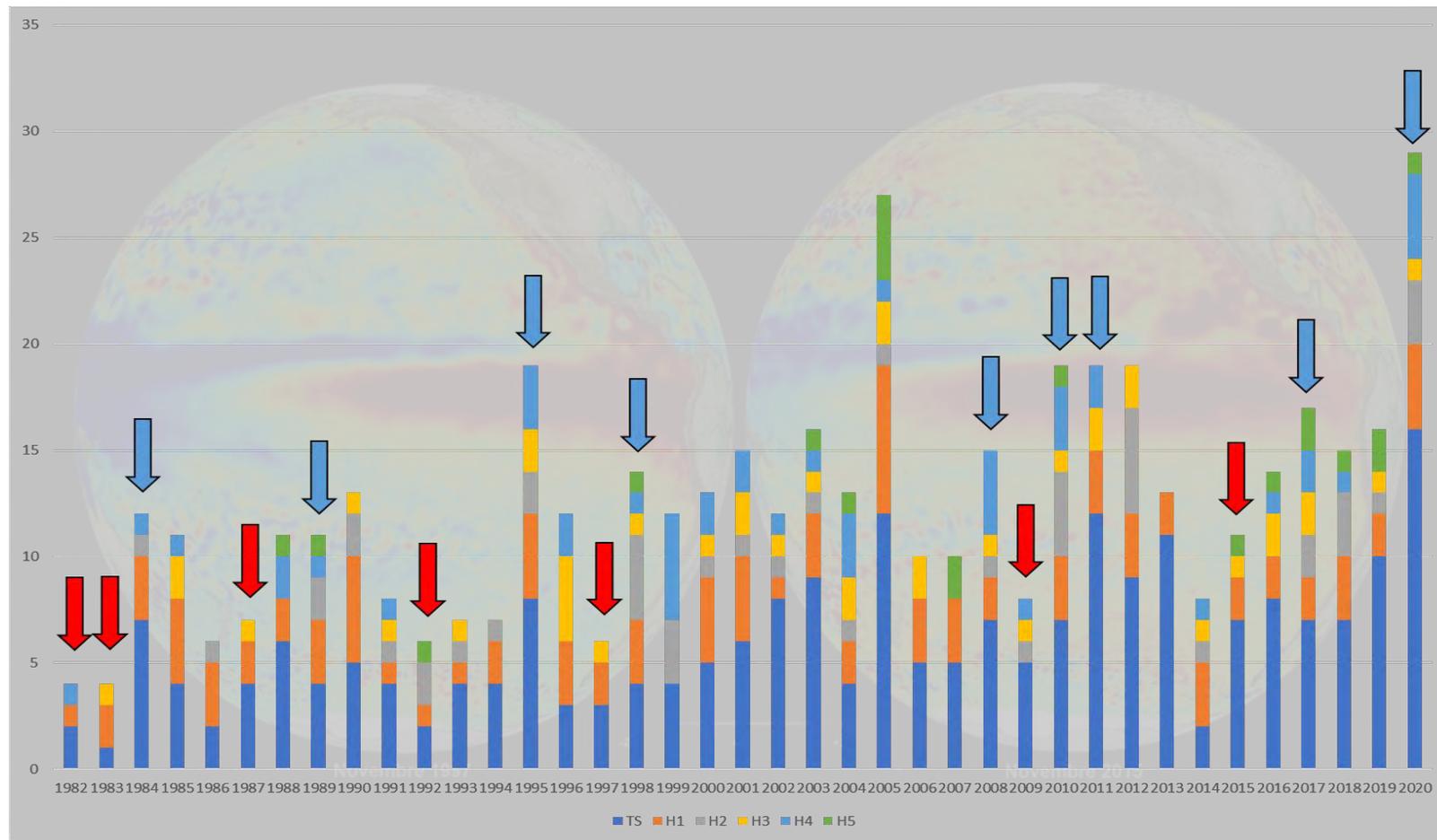
Durant un épisode La Niña, le phénomène est inversé





Document 6 : Cisaillement des vents et cyclones

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





Document 6 : Commentaires

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 provoquées 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 sur la température de surface et la Niña qui joue sur le cisaillement des vents on dispose de mécanismes déterminants pour l'activité cyclonique



Document 7 : Evolutions futures de l'activité cyclonique

[...] 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 CO2..., 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.

[...] 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.



Document 7 : Commentaires

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



Expliquer le changement climatique à partir des données spatiales

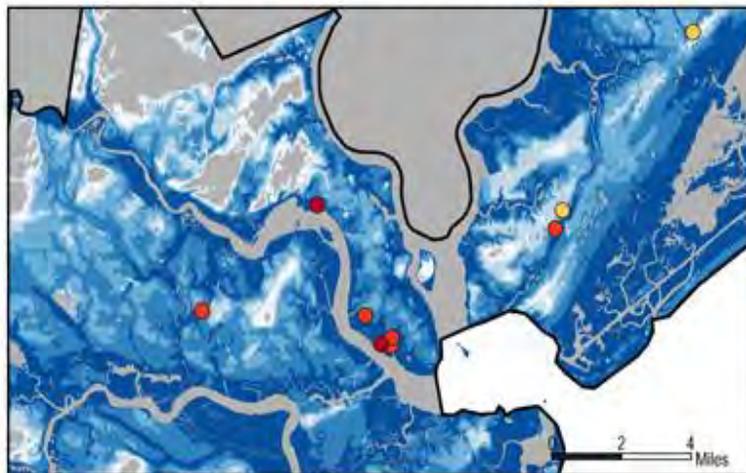
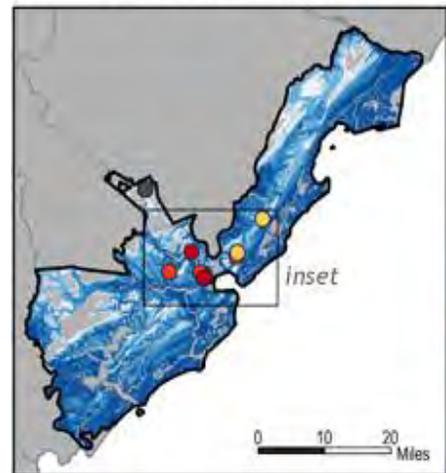
L'état des connaissances ne permet pas d'avoir de certitudes sur l'évolution future de l'activité cyclonique et plusieurs scénarii sont envisageable

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 ces modèles

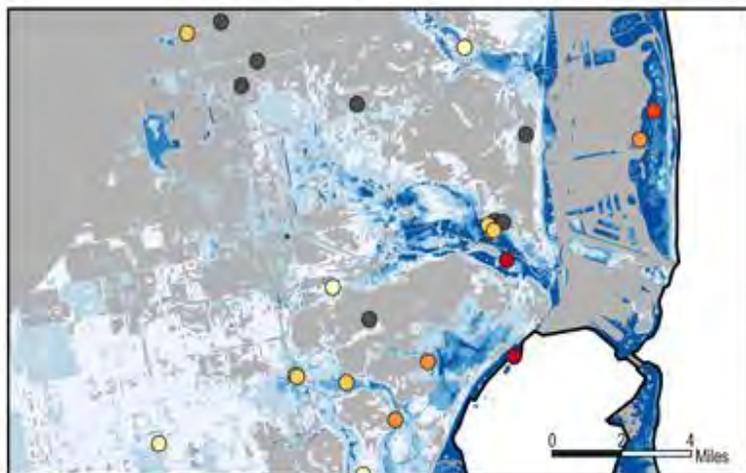
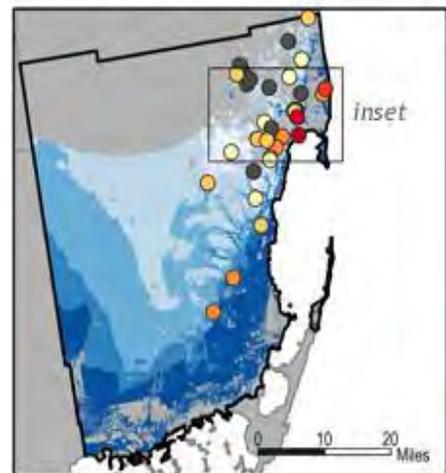
Charleston County, SC

Charleston, SC Inset Area



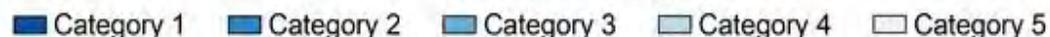
Miami-Dade County, FL

Miami, FL Inset Area



Hurricane Flooding

© NASA



Hospital Flooding by Hurricane Category



NCA4, Figure 14.3

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

What we need is
SCIENCE
SCIENCE
SCIENCE
and more
SCIENCE



© NASA



Changement climatique et activités cyclonique : Des questions en suspens...

Où sont localisées les dépressions à l'origine des cyclones ?

A quelle vitesse ce déplace les cyclones ?

Quelles sont les précipitations associées au cyclones ?

Quelles sont les températures de surface des océans dans les zones de formation ?

Quelles sont les températures de surface des océans le long de la trajectoire des océans ?

Quelles est la vitesse maximale mesurée ?

Quelles sont les trajectoire des cyclones ?

de temps met un cyclone pour se former ?

Quelles sont les vitesses de vents associés ?

Combien de cyclone chaque année ?

Combien de temps met un cyclone pour atteindre sa puissance maximale ?

Situation actuelle

Observation →

Evolution mesurée

Modèle →

Evolution projetée



Changement climatique et activités cyclonique : Des questions en suspens...

Observer les cyclones

Evaluer la vitesse
du vent

Mesurer la
température de
surface des océans

Quantifier les
précipitations
associées

Situation actuelle

Observation →

Evolution mesurée

Modèle →

Evolution projetée



Observer les cyclones

Naissance et vie d'un cyclone: « Attrapez les tous ! »

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

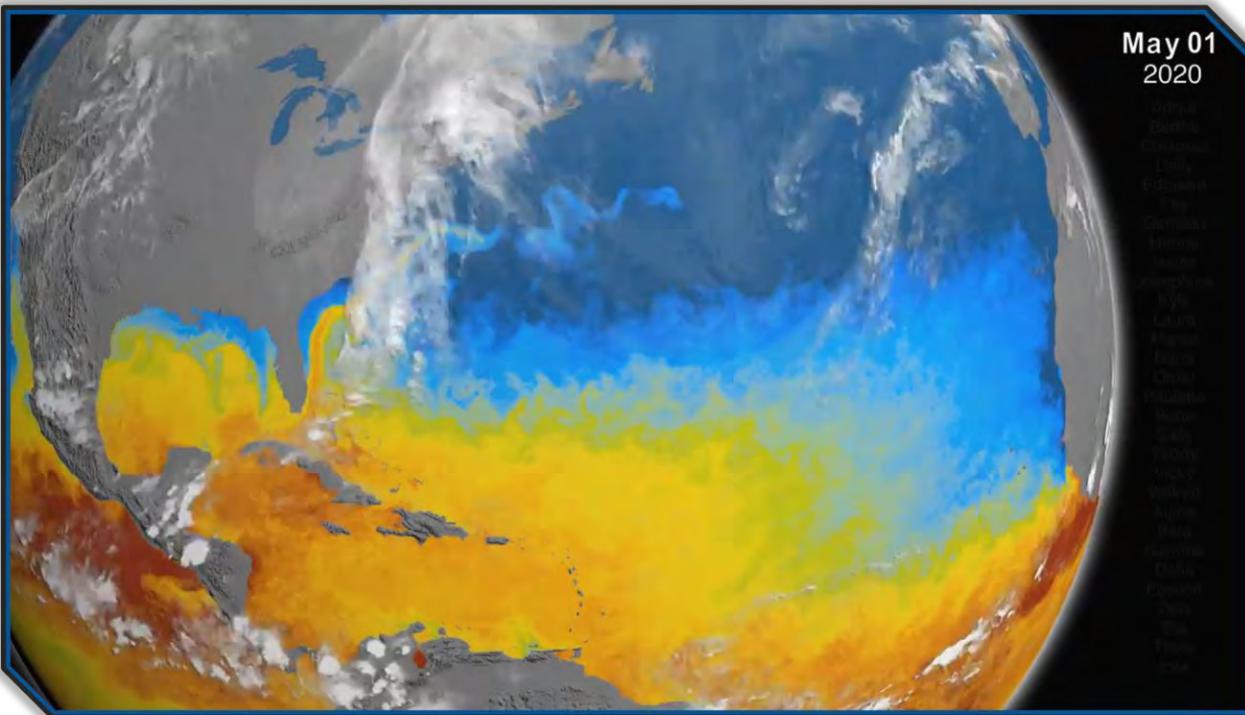


Ana, première tempête tropicale de la saison 2021



Observer les
cyclones

Trajectoires et vitesses de déplacement



L'année cyclonique 2020

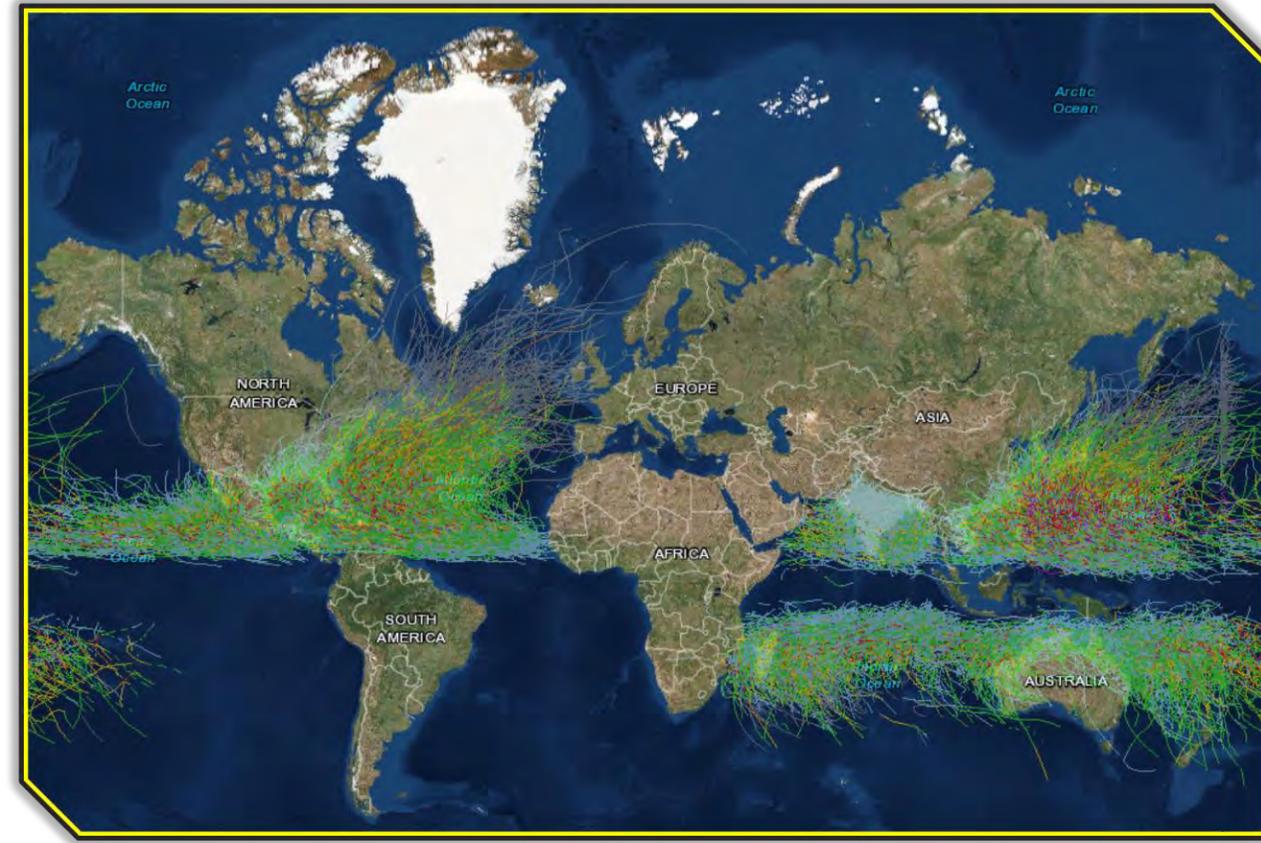
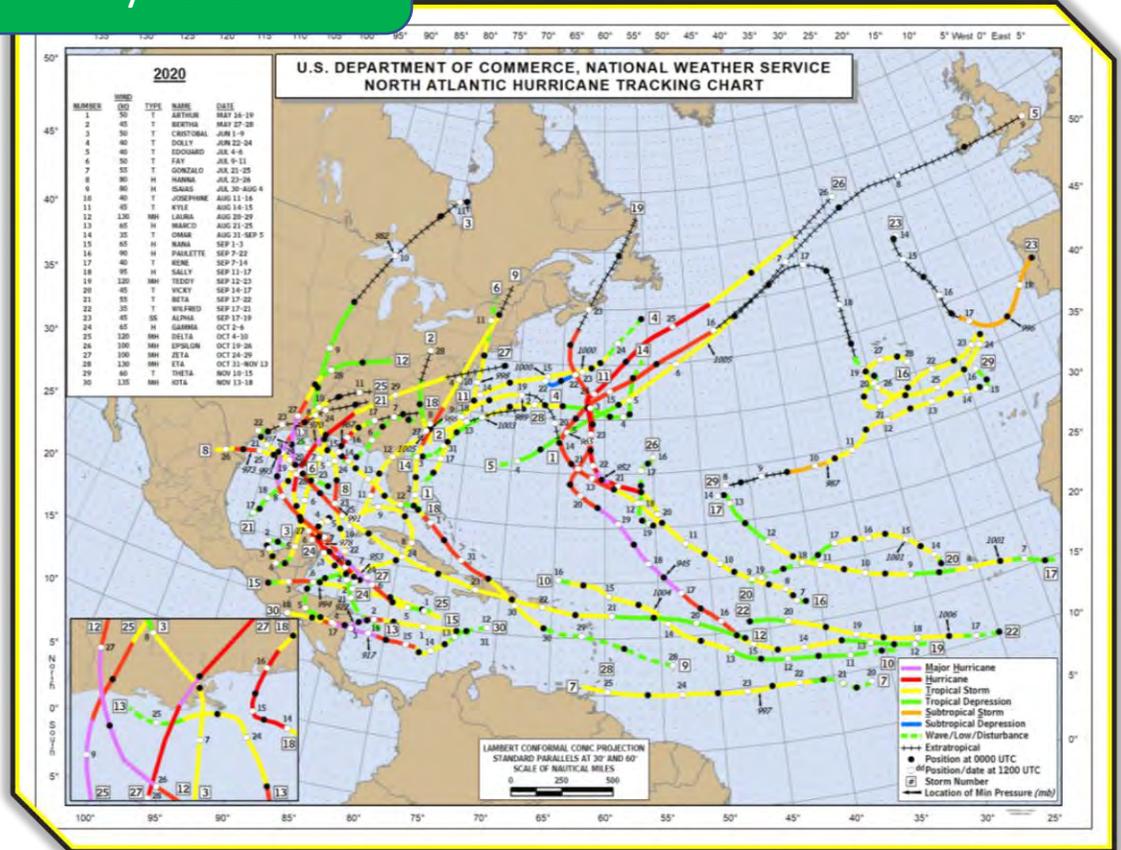


Observer les cyclones

© NOAA

Recensez les cyclones

© Domaine public



Trajectoires des cyclones de l'année 2020 dans l'Atlantique et celle cumulées depuis 1870 sur l'ensemble des bassins cycloniques

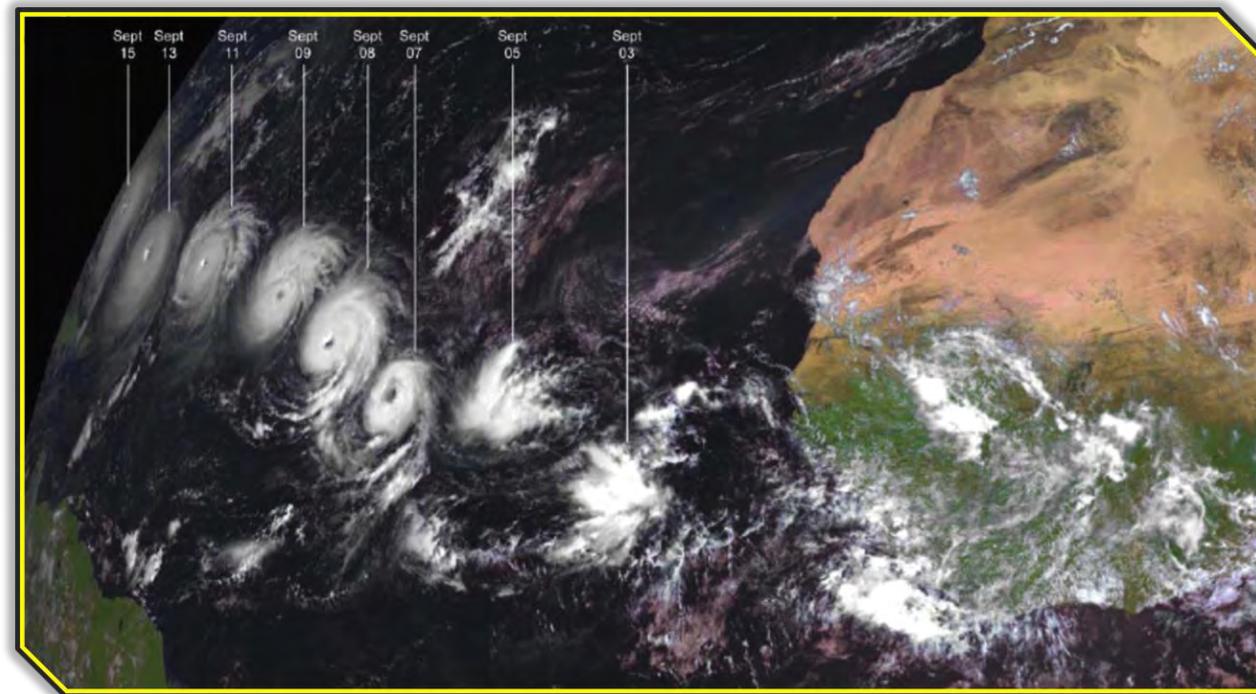


Observer les cyclones

Technologies spatiales

L'observation et le suivi des cyclones se fait essentiellement grâce à des satellites météorologiques géostationnaires 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



© NASA

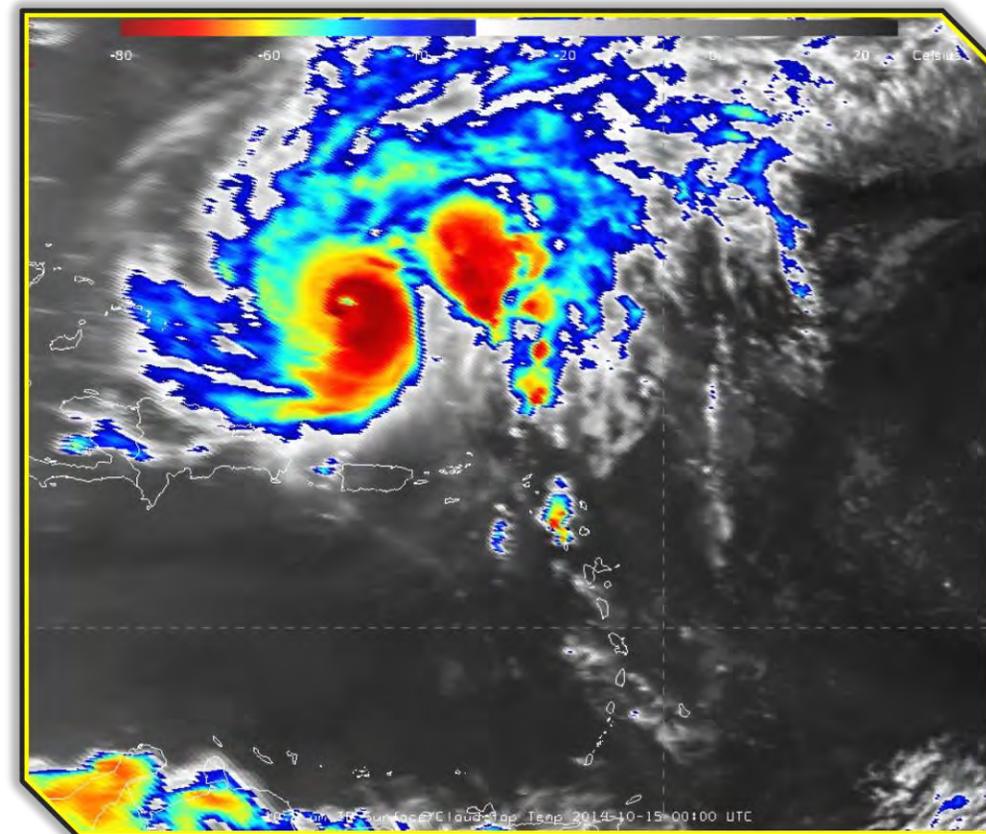


Observer les cyclones

Technologies spatiales

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.



<https://www.eumetsat.int/>



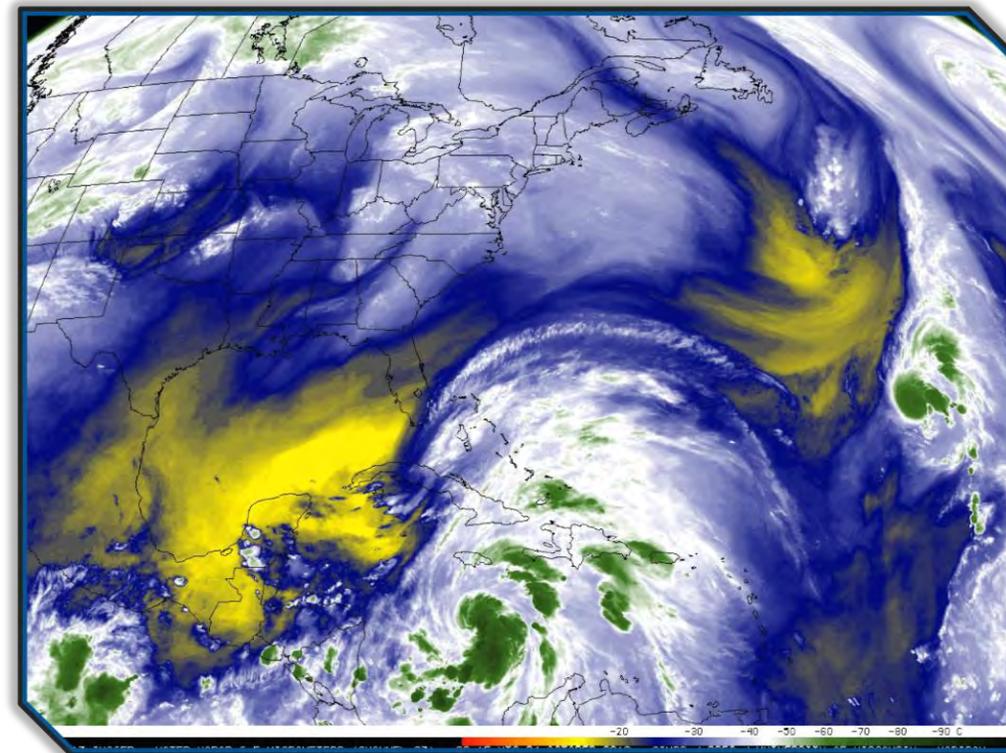
Observer les cyclones

Technologies spatiales

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.



Vue d'une partie du cycle de vie de Sandy observé par GOES-13 6.5 μm images du canal de vapeur d'eau à des intervalles de 1 heure au cours de la période du 24 Octobre - 30 Octobre.



Observer les cyclones

L'imagerie spatiale permet de recenser avec certitude l'ensemble des phénomènes cycloniques

Leur suivi en temps réel permet d'appréhender et de dénombrer :

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

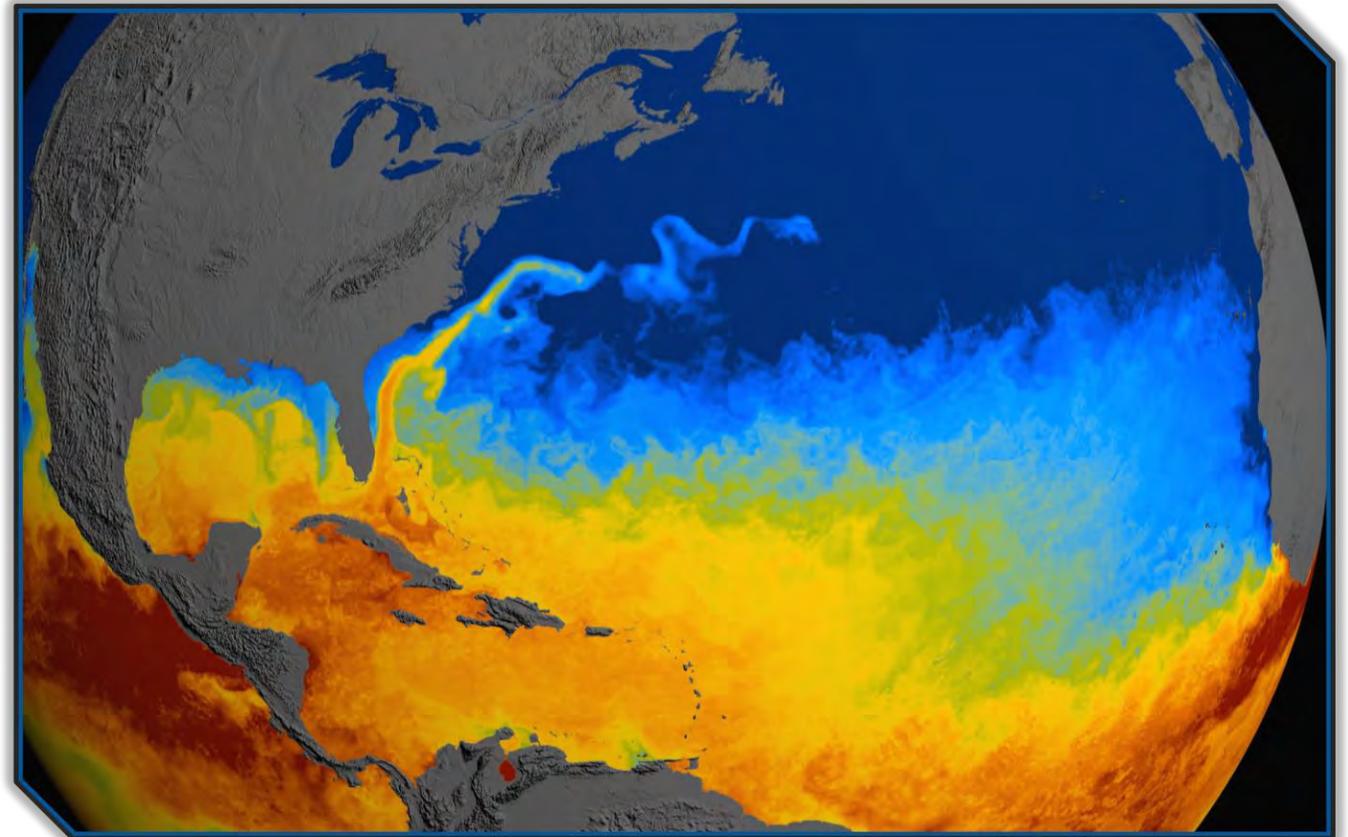


Mesurer la
température de surface
des océans

Température de surface des océans des zones de formation

La cyclogenèse dépend essentiellement de deux facteurs :

- De la préexistence d'une dépression dans cette même zone
- La température de l'océan (au sein d'une zone suffisamment éloignée de l'équateur)



Température de surface de l'Atlantique pendant la saison cyclonique 2020

© NOAA

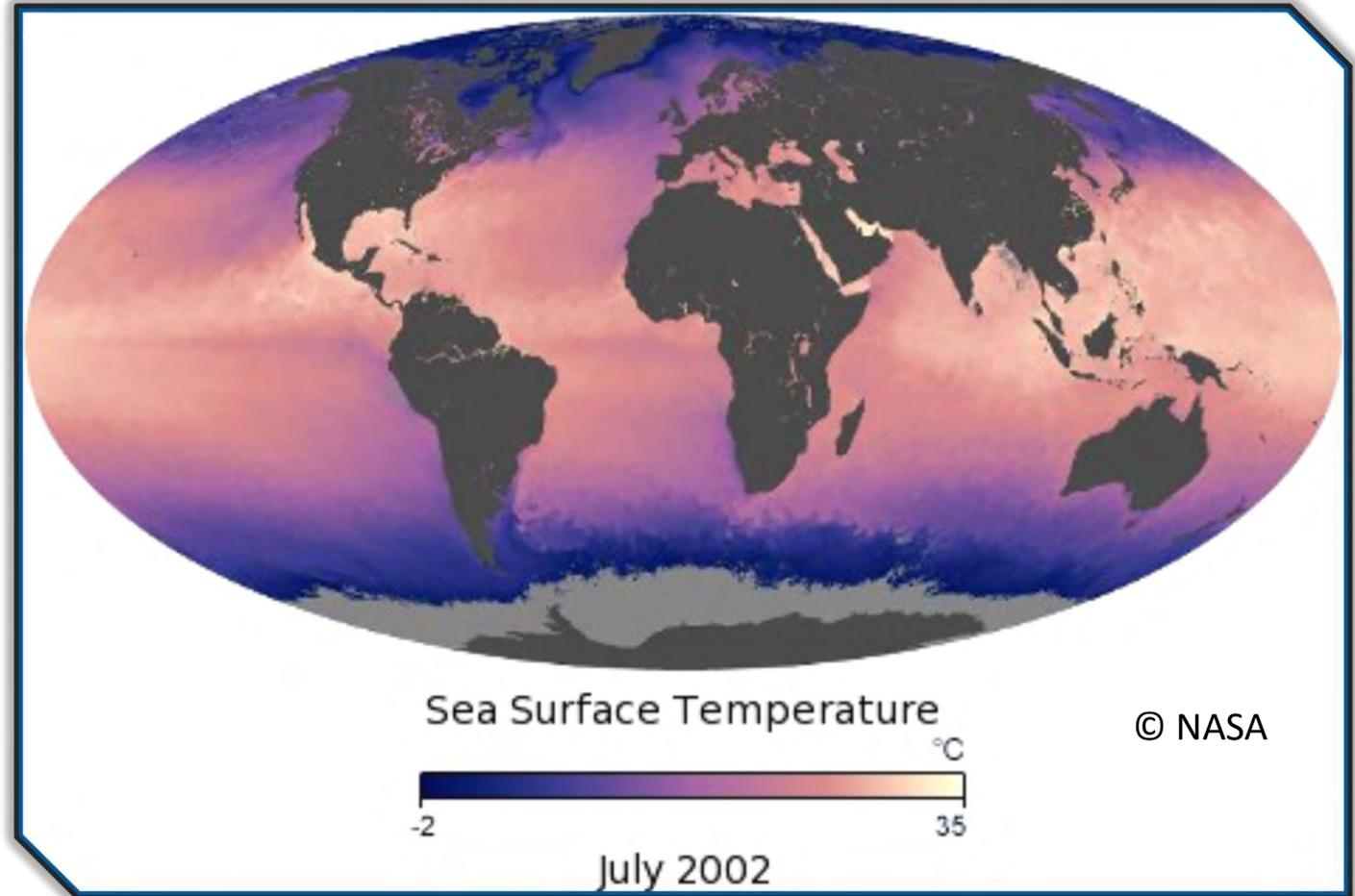


Mesurer la
température de surface
des océans

Evolution des température de surface des océans

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



Evolution de la SST entre 2002 et 2020

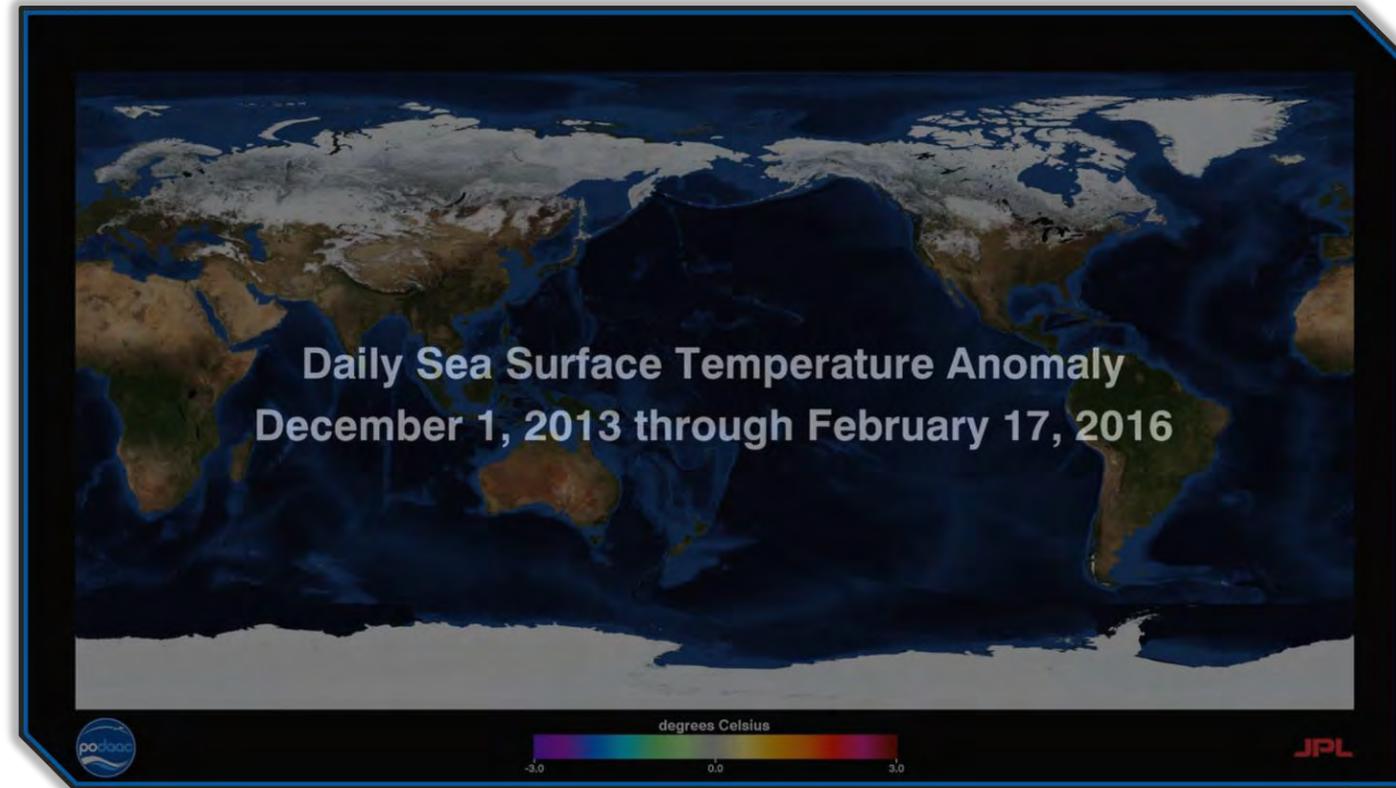


Mesurer la
température de surface
des océans

Repérer des éléments de la variabilité interne affectant l'activité cyclonique

Des évènements comme la Niña affecte significativement l'activité cyclonique

Ces évènements propres à la variabilité interne peuvent être repérés depuis l'Espace par monitoring des température de surface



Evolution de la SST durant un épisode El Niño

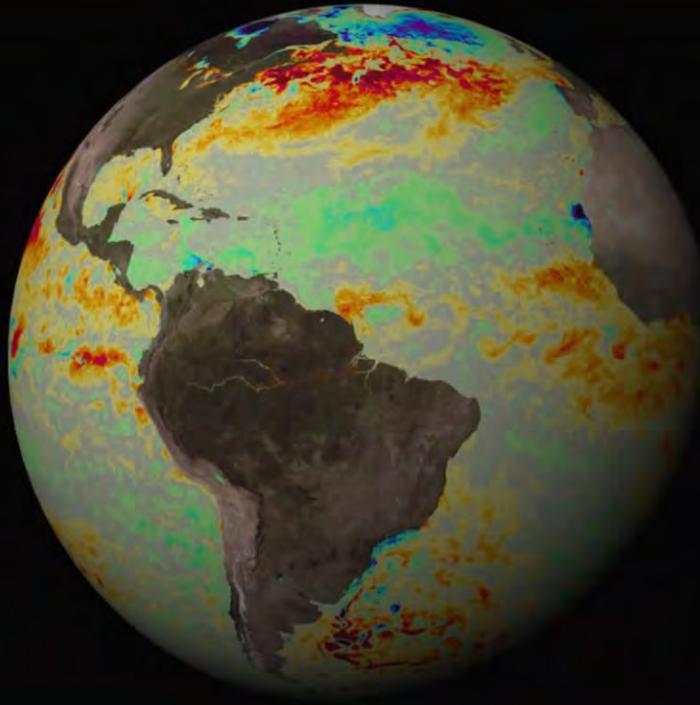
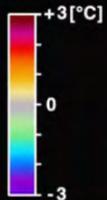


Mesurer la
température de surface
des océans

Montrer les interaction Océan/Cyclone par l'observation de la SST



Sea Surface
Temperature
Anomaly



2018-08-28
00:00

- Hurricane
- Tropical Storm
- Tropical Depression

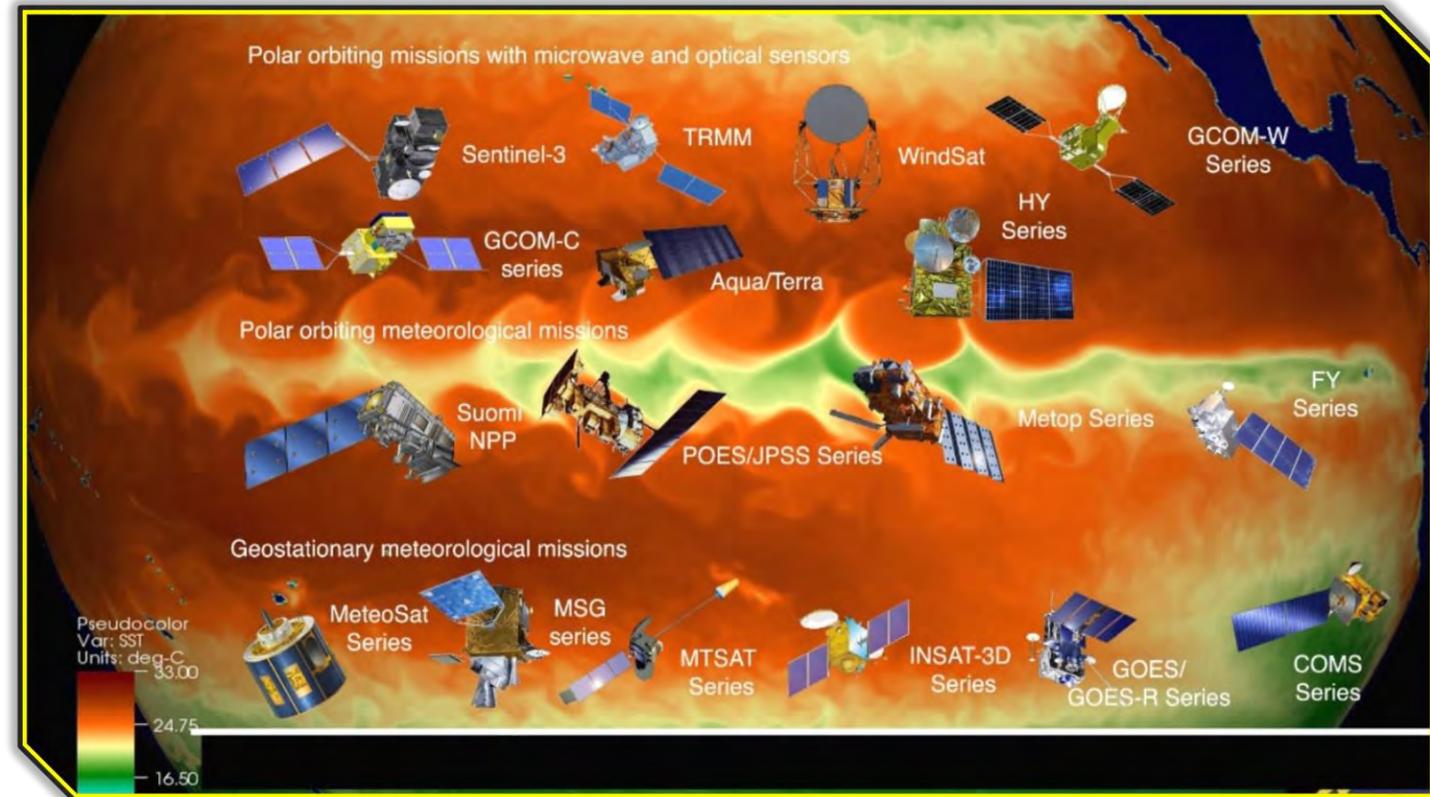
Evolution de la température de surface de la mer (SST) aux passages des ouragans Florence, Helene et Isaac de 2018. Il est courant d'observer des traînées d'eau plus froide, ou des sillages froids, le long des traces d'ouragans en raison du mélange induit par le vent et de la turbulence qui amène les eaux froides en profondeur à la surface. Les sillages froids associés à Florence, Helene et Isaac sont clairement observés alors que les eaux sont environ 2 °C plus fraîches par rapport à la normale le long de la trajectoire de l'ouragan qui a persisté pendant plusieurs jours.



Mesurer la
température de surface
des océans

Technologies spatiales

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 de satellite mesurant la SST

© NASA



Mesurer la température de surface des océans

Technologies spatiales

Les mesures infrarouges thermiques de SST sont dérivées 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.

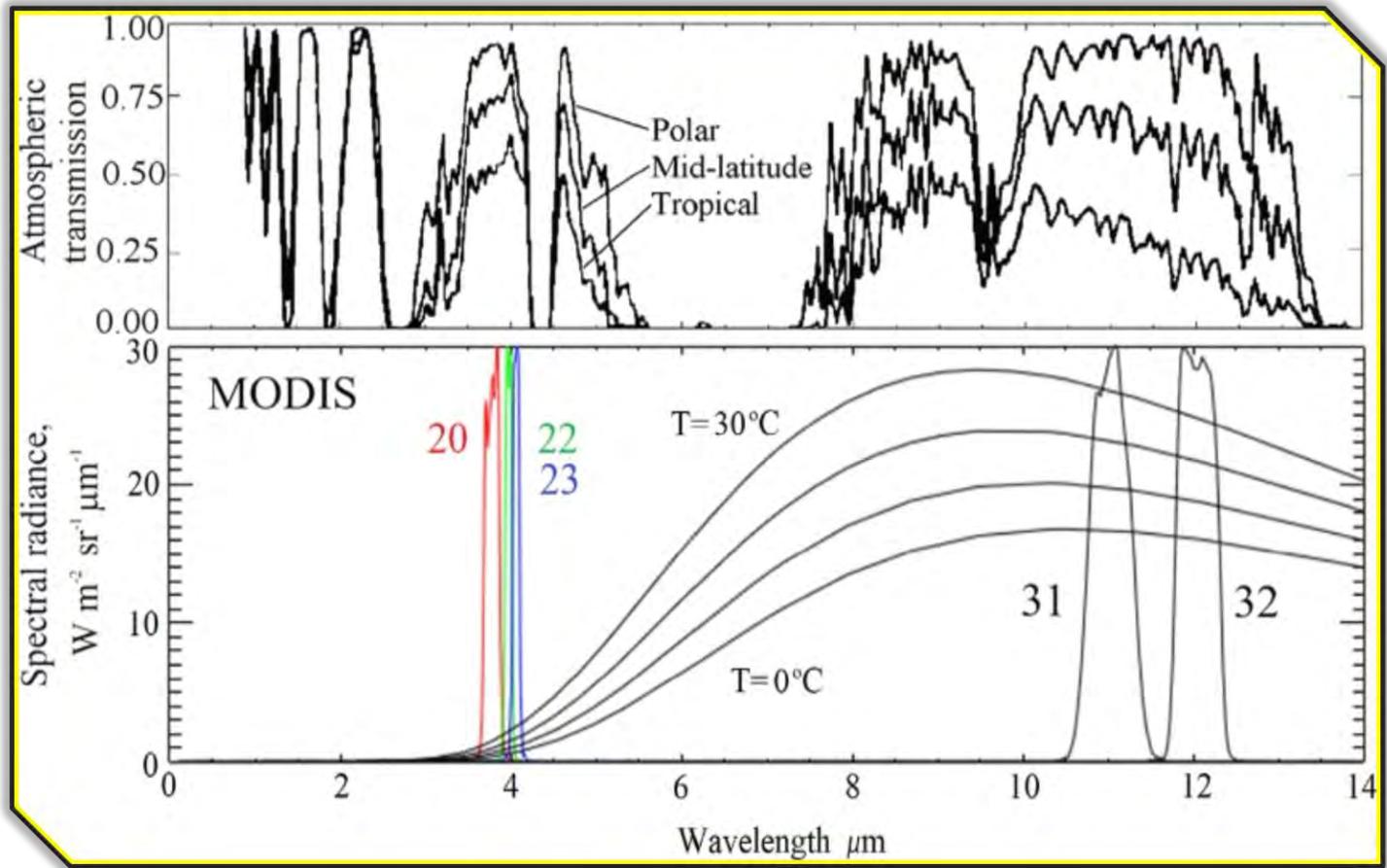
Les deux bandes sont sensibles à la présence de nuages et à la dispersion par les aérosols et la vapeur d'eau atmosphérique. Pour cette raison, les mesures infrarouges thermiques de SST nécessitent d'abord une correction atmosphérique du signal récupéré et ne peuvent être effectuées que pour les pixels sans nuages.

Ainsi, les cartes de SST compilées à partir de mesures infrarouges thermiques sont souvent des composites hebdomadaires ou mensuelles qui permettent de disposer de suffisamment de temps pour capturer des pixels sans nuages sur une région



Mesurer la température de surface des océans

Technologies spatiales



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

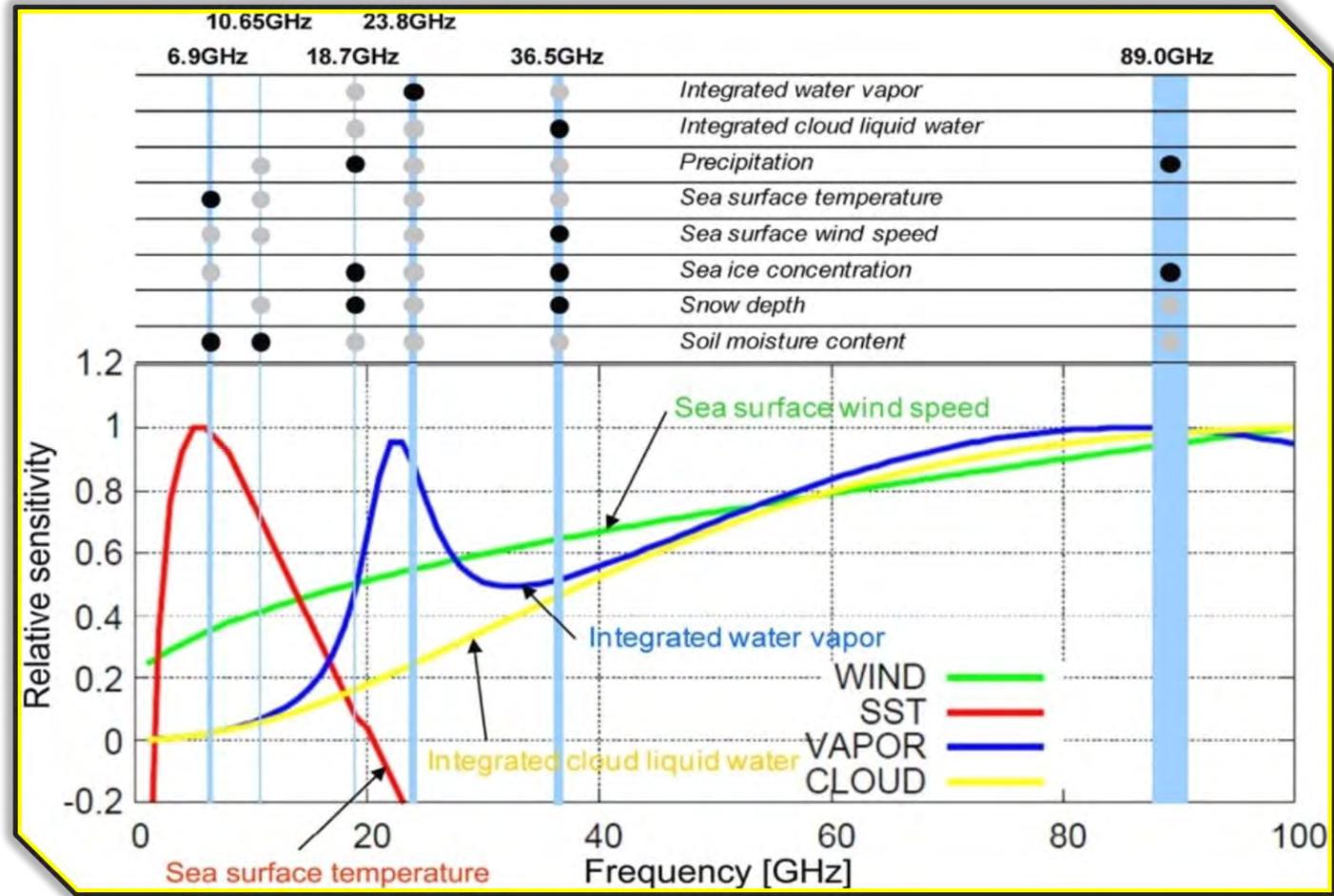


Mesurer la température de surface des océans

Technologies spatiales

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





Mesurer la
température de
surface des océans

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 incertitude sur la cyclogenèse (gradient de température vs valeur absolu)

Son évolution est décisive pour alimenter les modèles

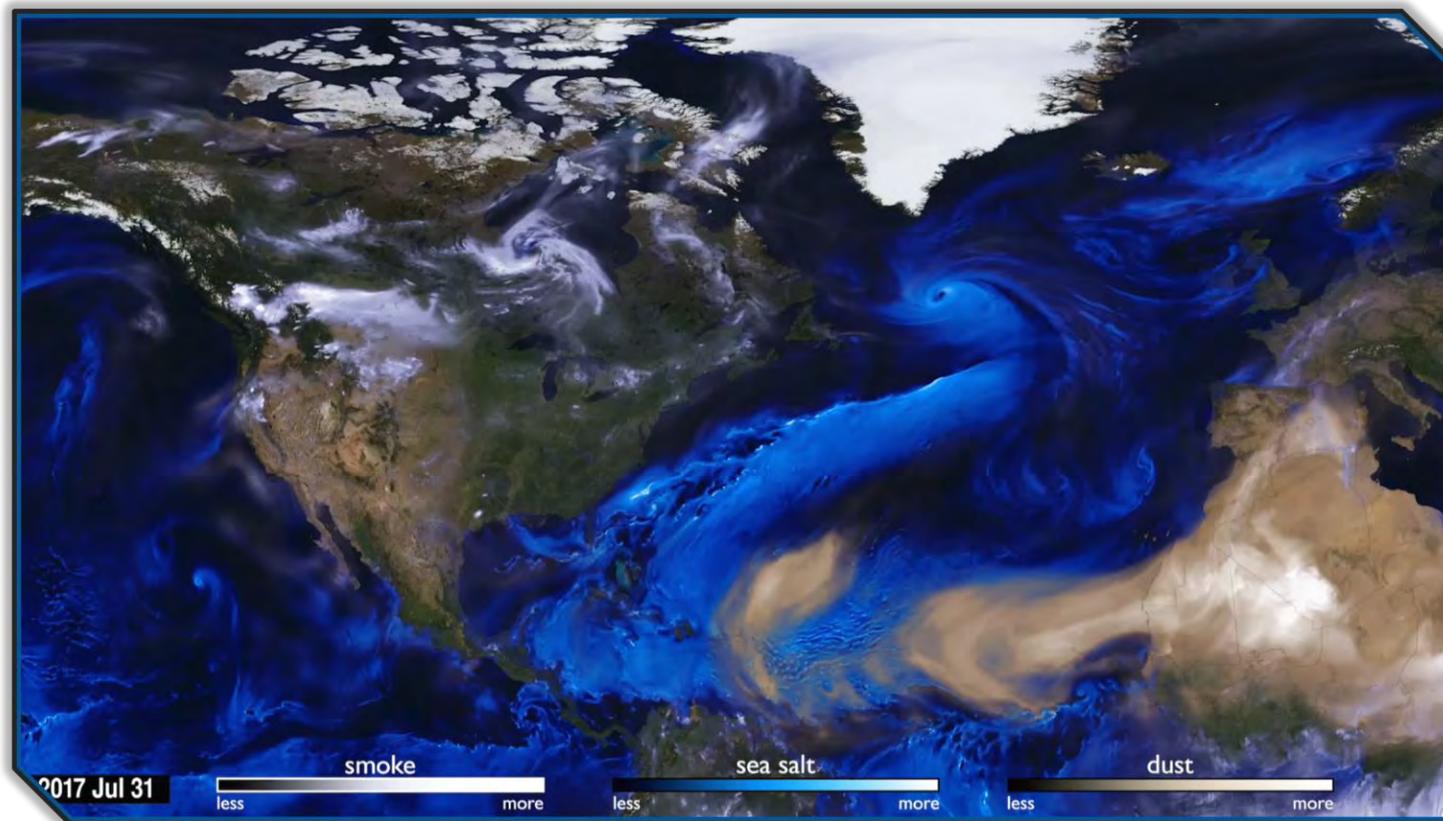


Evaluer la vitesse du vent

Vitesse des vents et cyclonique

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

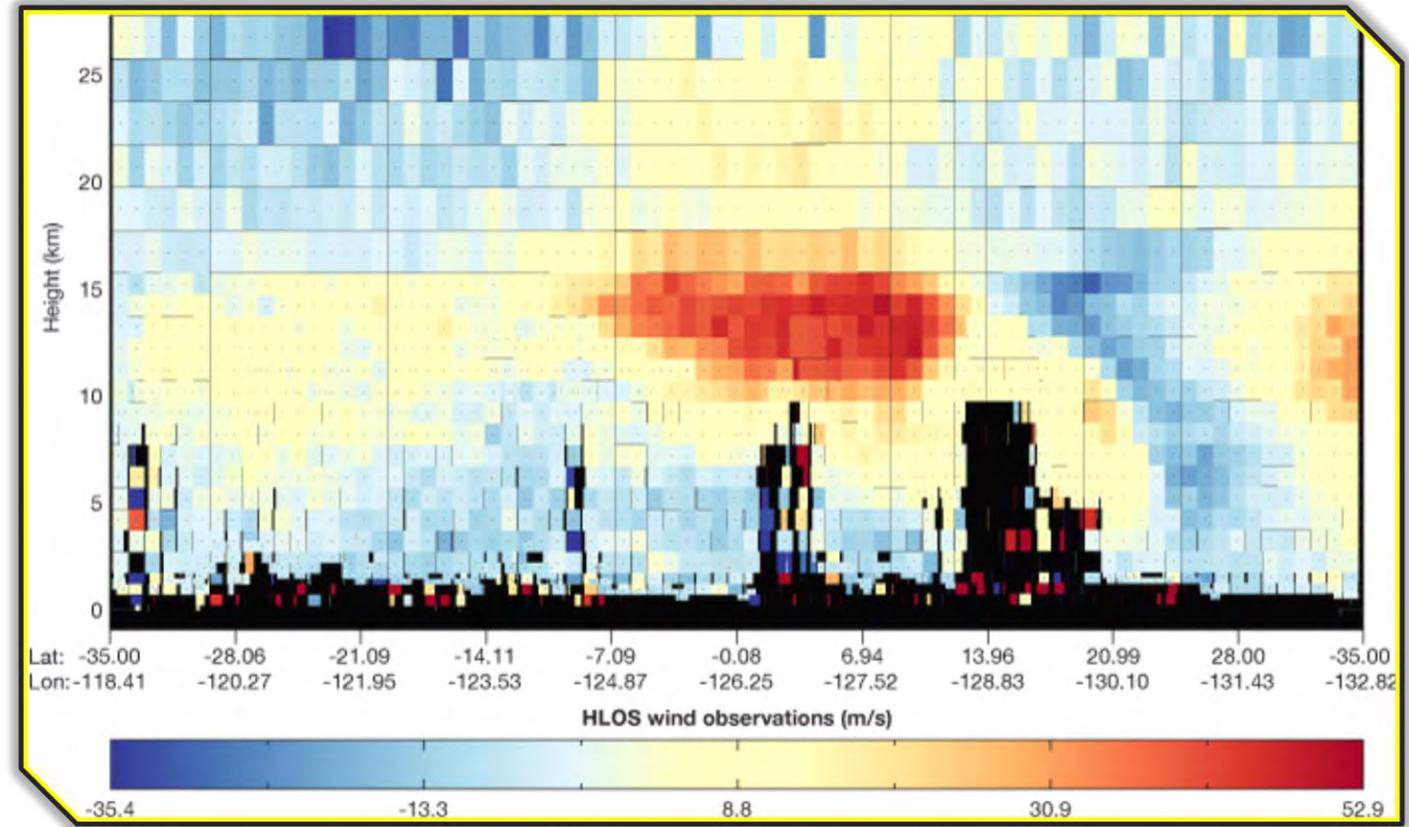




Evaluer la vitesse
du vent

Vitesse des vents et cyclonique

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





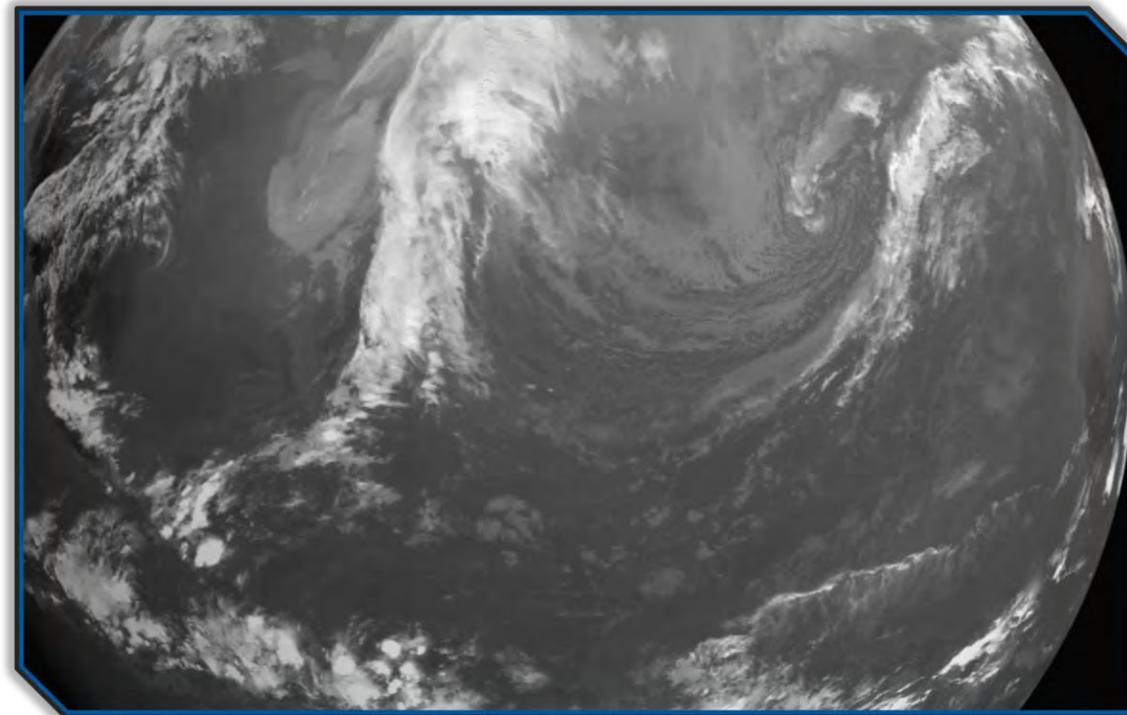
Evaluer la vitesse du vent

Technologies spatiales

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.





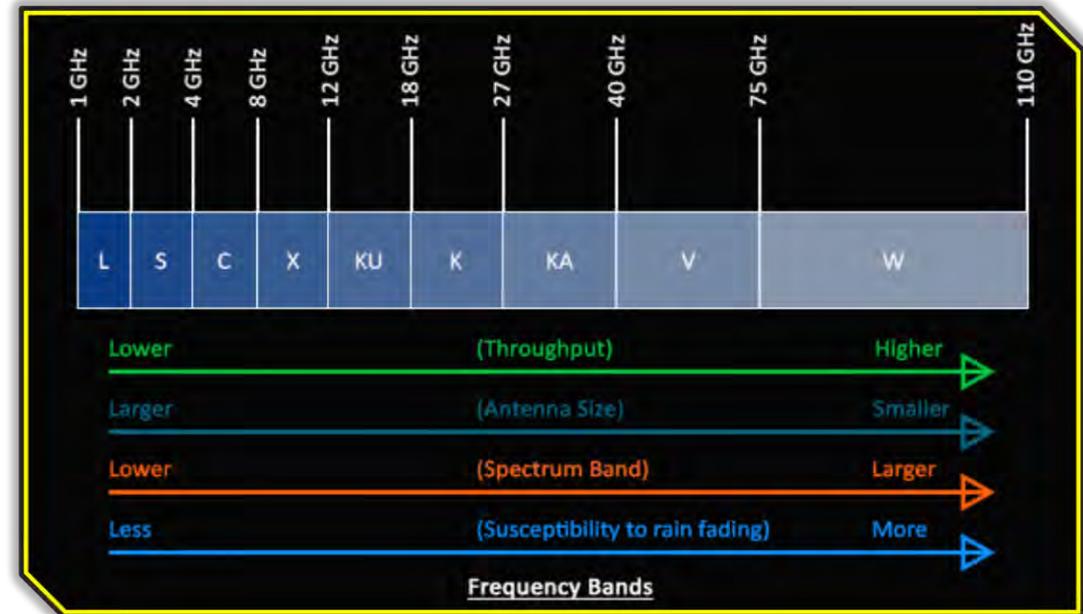
Evaluer la vitesse
 du vent

Technologies spatiales

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 des températures de luminosité de l'océan.

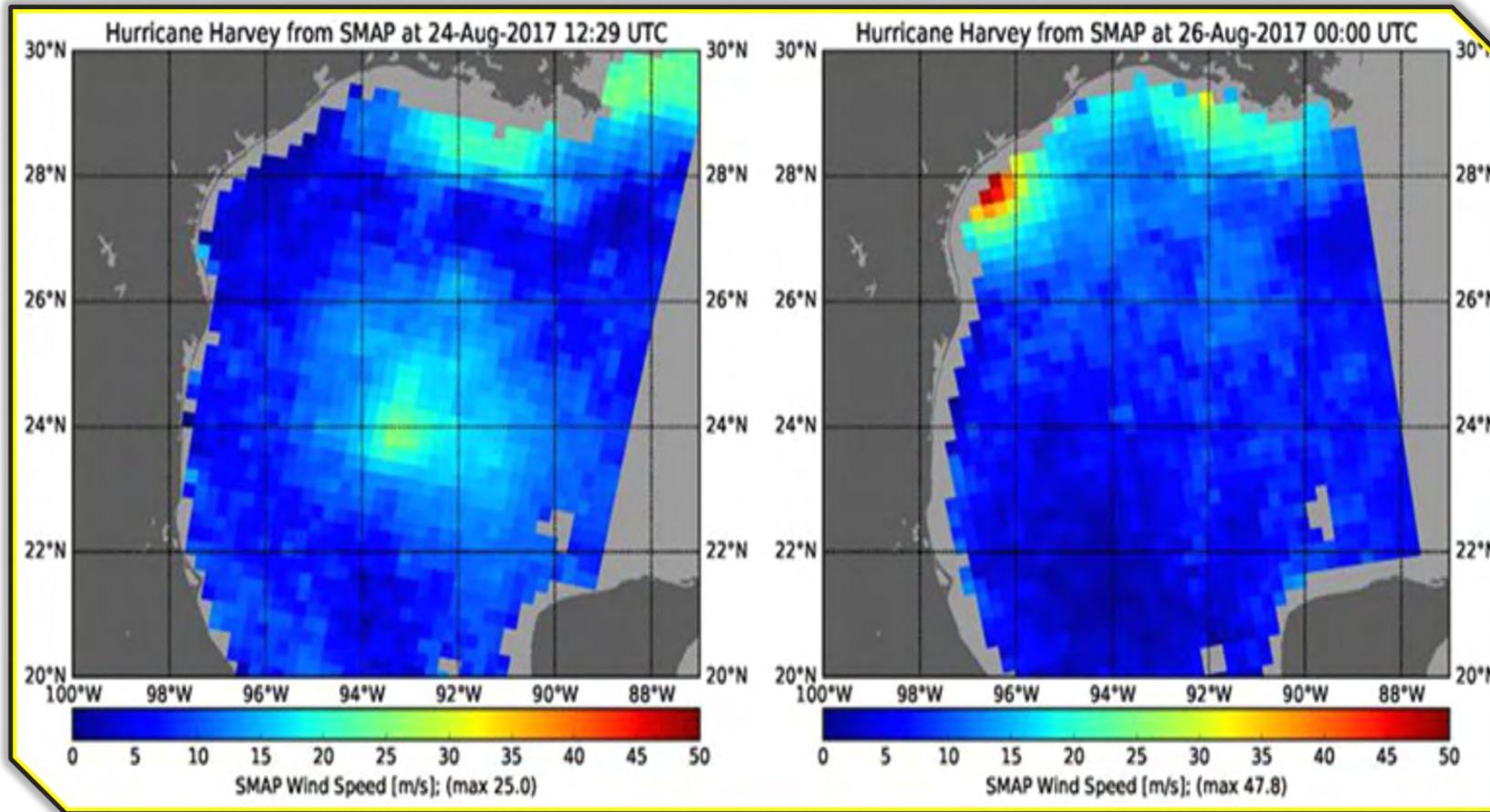
Cette technique est inutilisable au-dessus des continents.





Evaluer la vitesse du vent

Technologies spatiales



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 série 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).

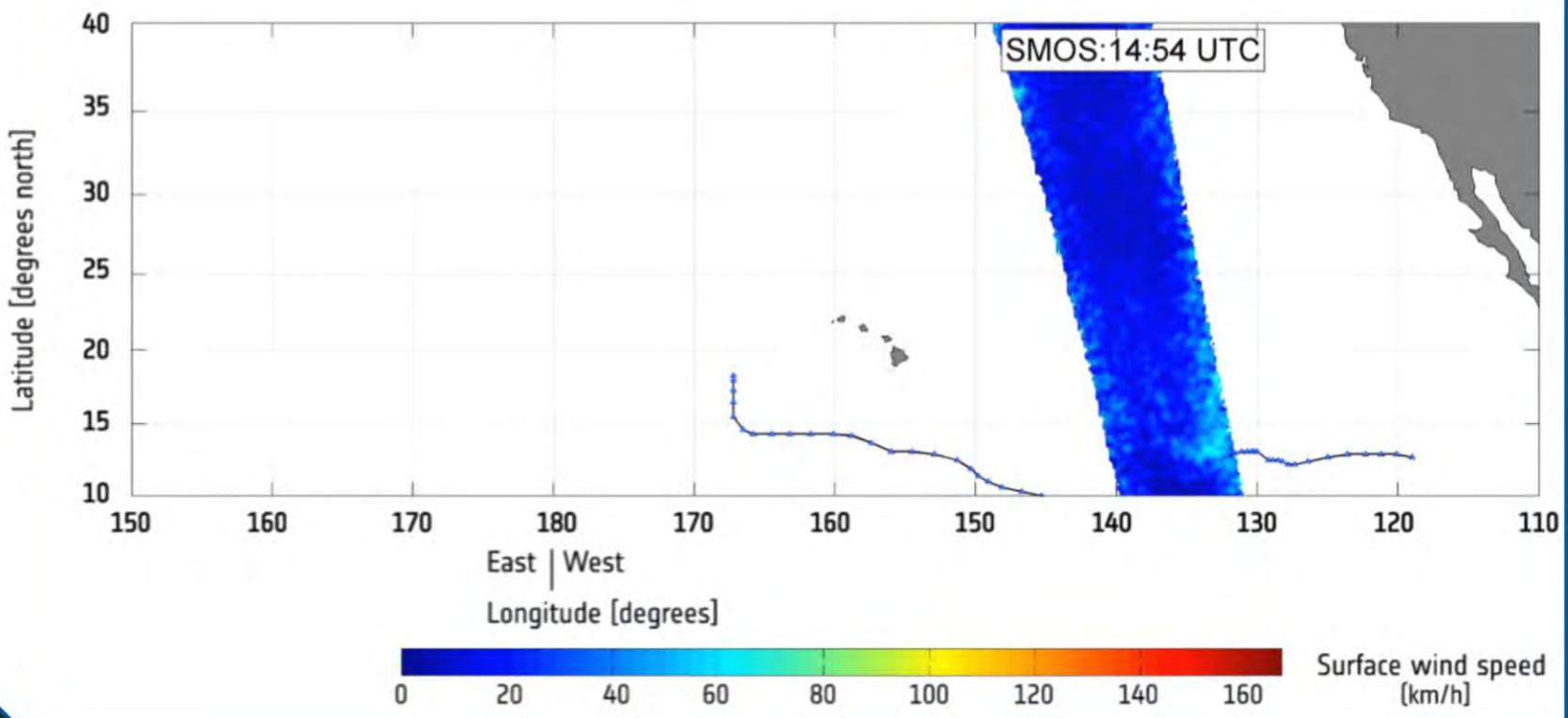
La couleur indique la vitesse du vent, le rouge étant le plus haut et le bleu le plus bas. Les images montrent que la vitesse maximale du vent de Harvey est passée d'environ 25 m/s à environ 47,8 ms dans les 36 heures précédant l'arrivée sur le continent



Évaluer la vitesse
du vent

Technologies spatiales

26 August 2015



Une mosaïque chronologique de mesures de la vitesse du vent de surface lors des ouragans Kilo, Ignacio et Jimena est montrée dans cette animation. Les données de trois missions de radiomètres à micro-ondes par satellite : SMOS en bande L de l'ESA, SMAP en bande L de la NASA et l'AMSR-2 en bande C du Japon sont combinées pour révéler la trajectoire de chaque ouragan et la vitesse maximale du vent mesurée par chaque capteur à la surface de l'océan.



Evaluer la vitesse du vent

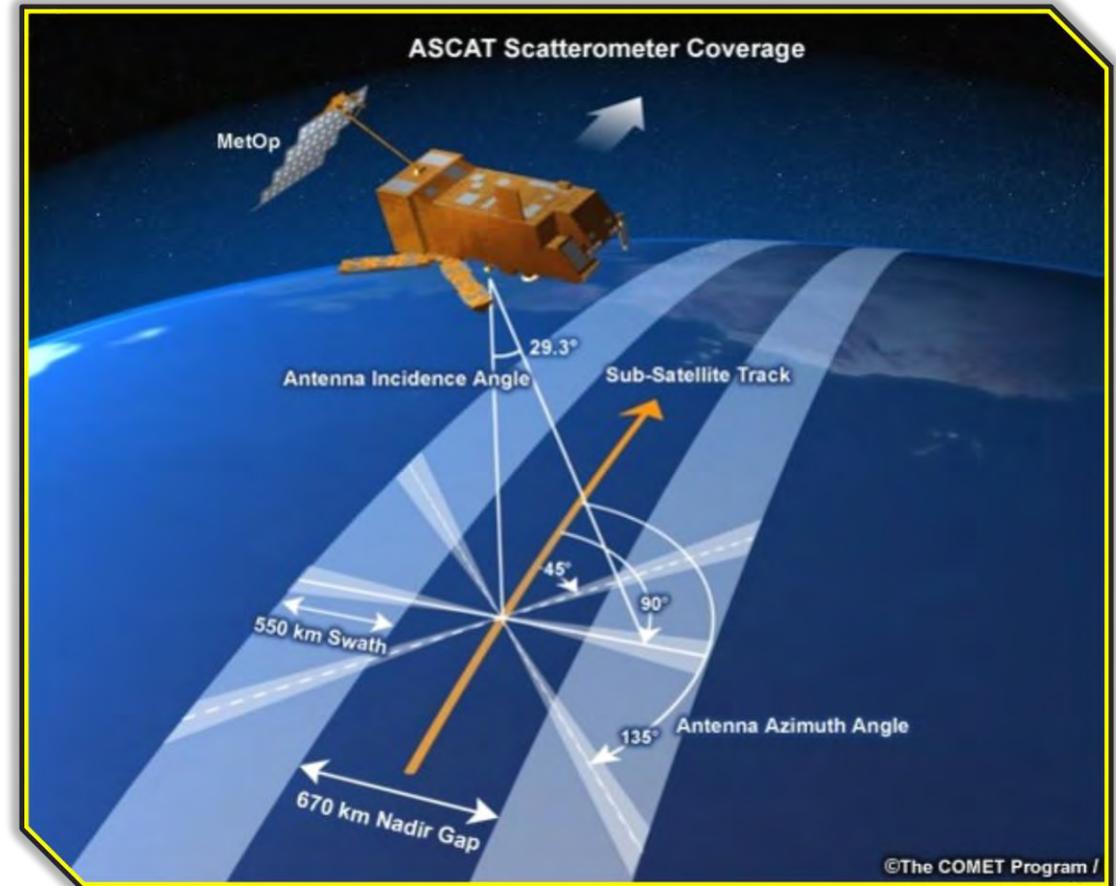
Les diffusiomètres sont des instruments actifs, de type radar, embarqués à bord des satellites défilants.

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.

Technologies spatiales





Evaluer la vitesse du vent

Technologies spatiales

Ces mesures effectuées par les diffusiomètres sont peu sensibles à la présence de nuages et à l'illumination solaire.

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).





Evaluer la vitesse du vent

Technologies spatiales

Lancée le 22 août 2018, Aeolus est la première mission satellite à acquérir des profils du vent terrestre à l'échelle mondiale.

Pour remplir sa mission le satellite 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 ultraviolette l'instrument Aladin peut mesurer la vitesse du vent même par temps clair contrairement à ses prédécesseurs.





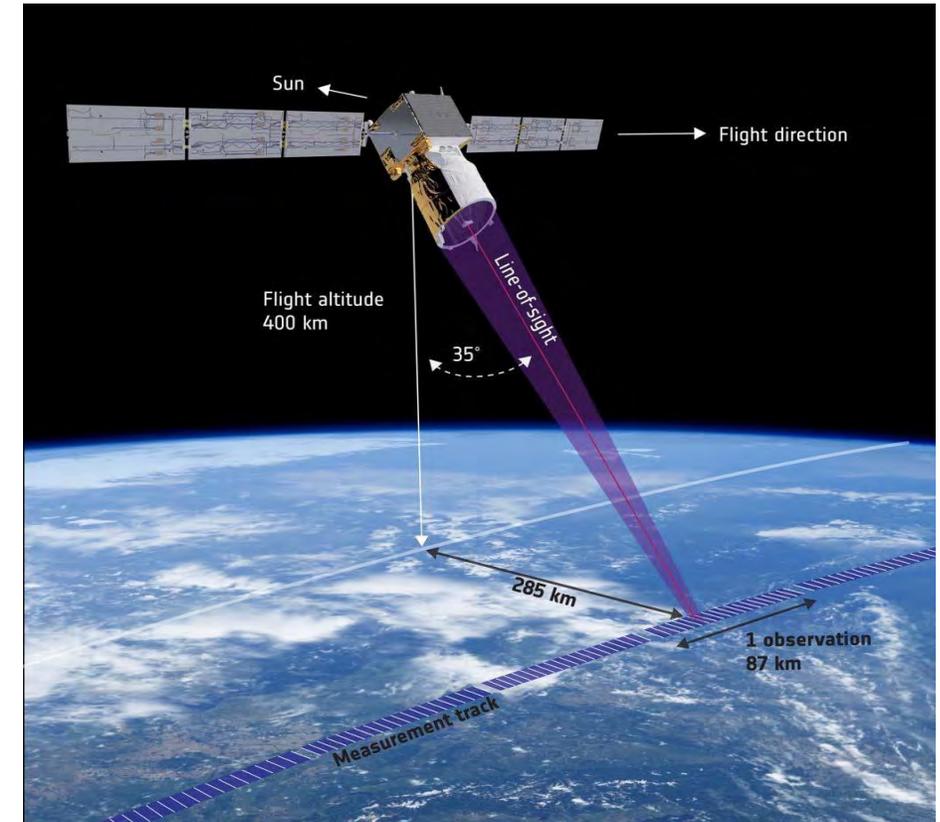
Evaluer la vitesse du vent

Technologies spatiales

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.





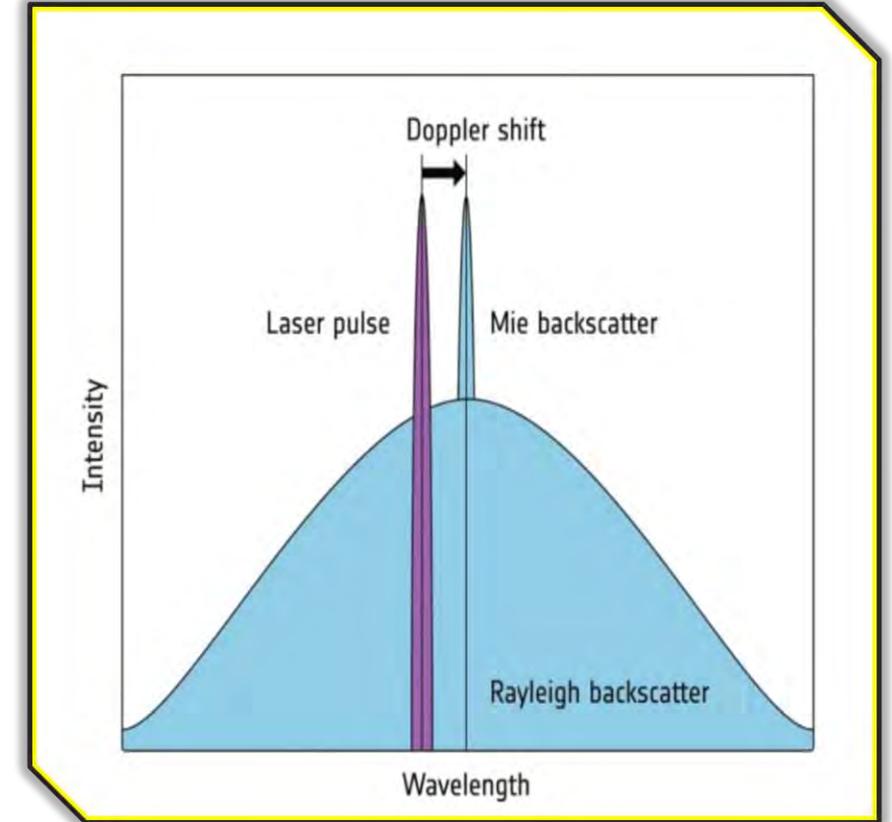
Evaluer la vitesse du vent

Technologies spatiales

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 réfléchie.

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 réfléchies cette lumière analysée et qui sont transportées par le vent.



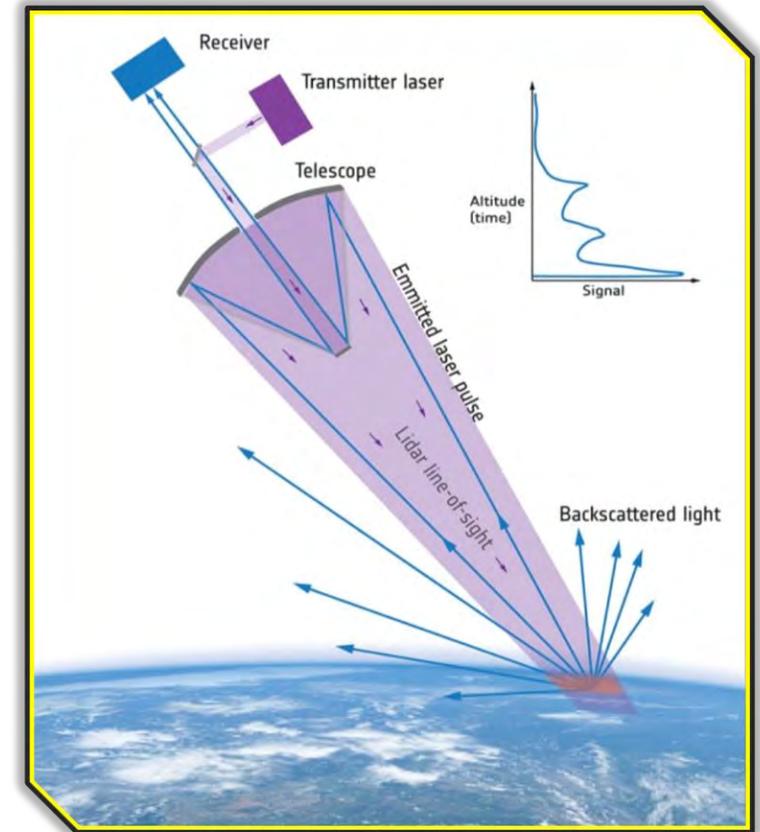


Évaluer la vitesse du vent

Technologies spatiales

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.

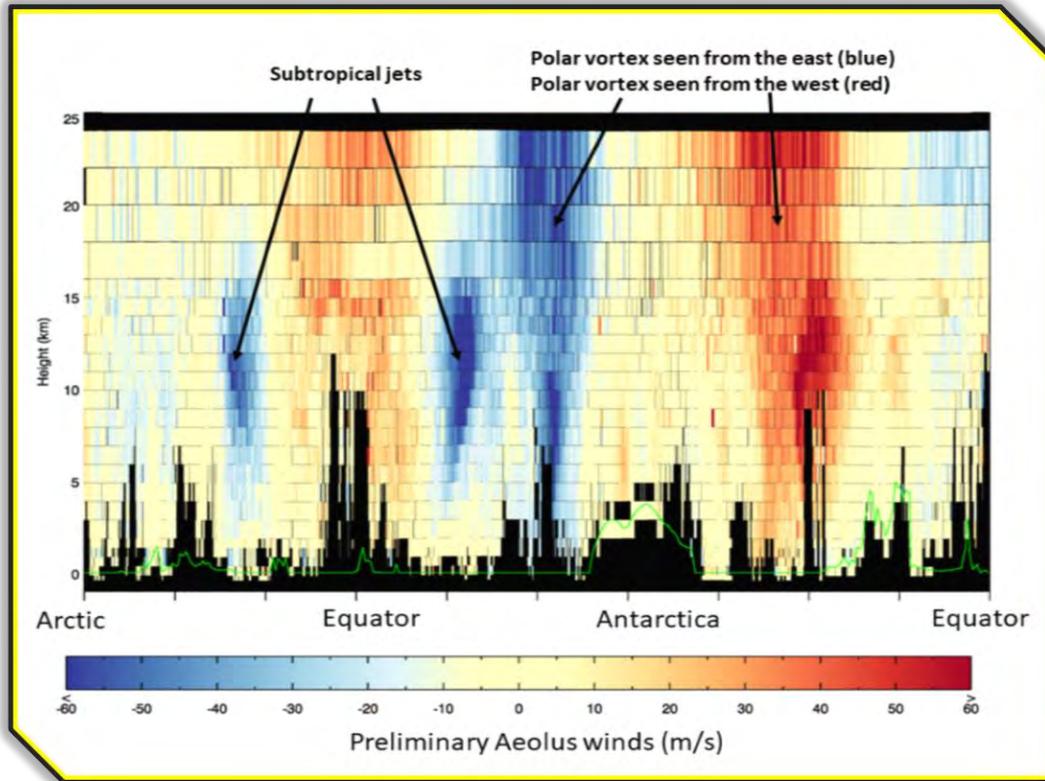
Pour analyser les deux catégories de rayonnement réfléchi, Aladin dispose de deux types d'interféromètre, un pour les photons renvoyés par les aérosols et grosses particules et un pour ceux réfléchis par les molécules. La vitesse des vents est déterminée avec une précision de 1 à 2 mètres par seconde en fonction de l'altitude.





Evaluer la vitesse du vent

Technologies spatiales



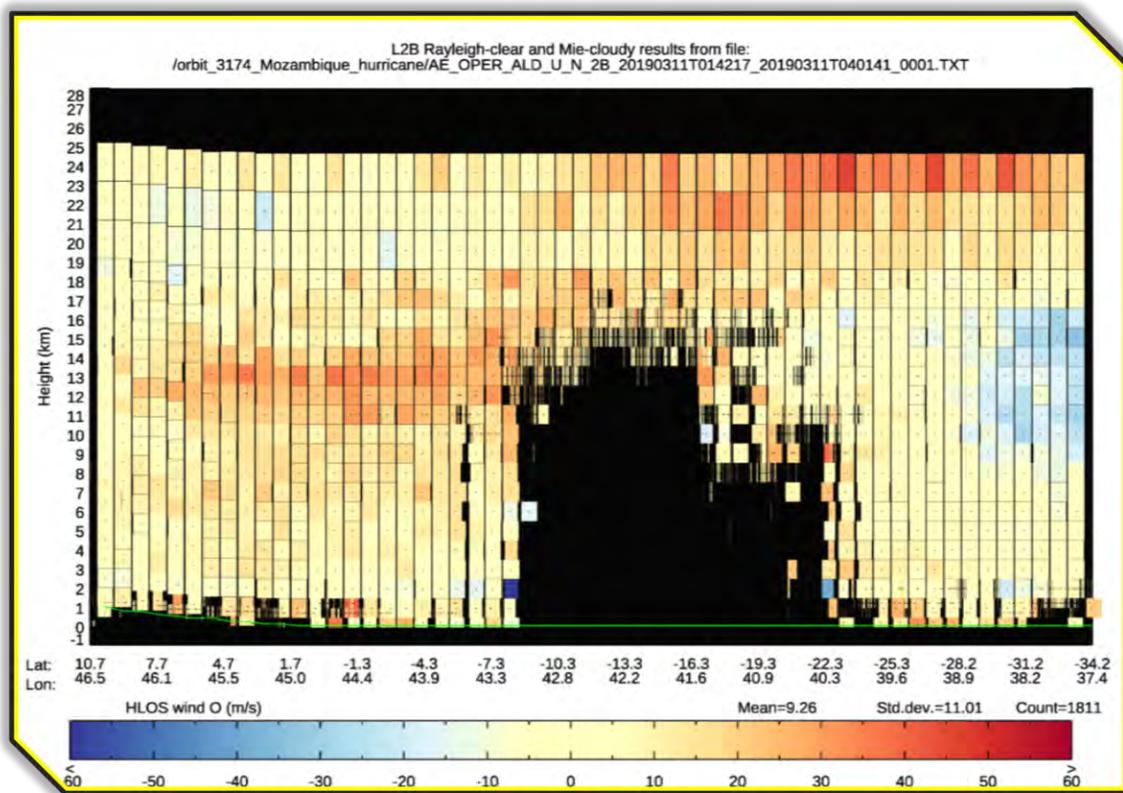
Ces données proviennent des trois quarts d'une orbite autour de la Terre. L'image montre des vents d'est et d'ouest à grande échelle entre la surface de la Terre et la stratosphère inférieure, y compris les courants-jets. Comme le satellite orbite de l'Arctique vers l'Antarctique, il détecte, par exemple, 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



Evaluer la vitesse

 du vent

Technologies spatiales

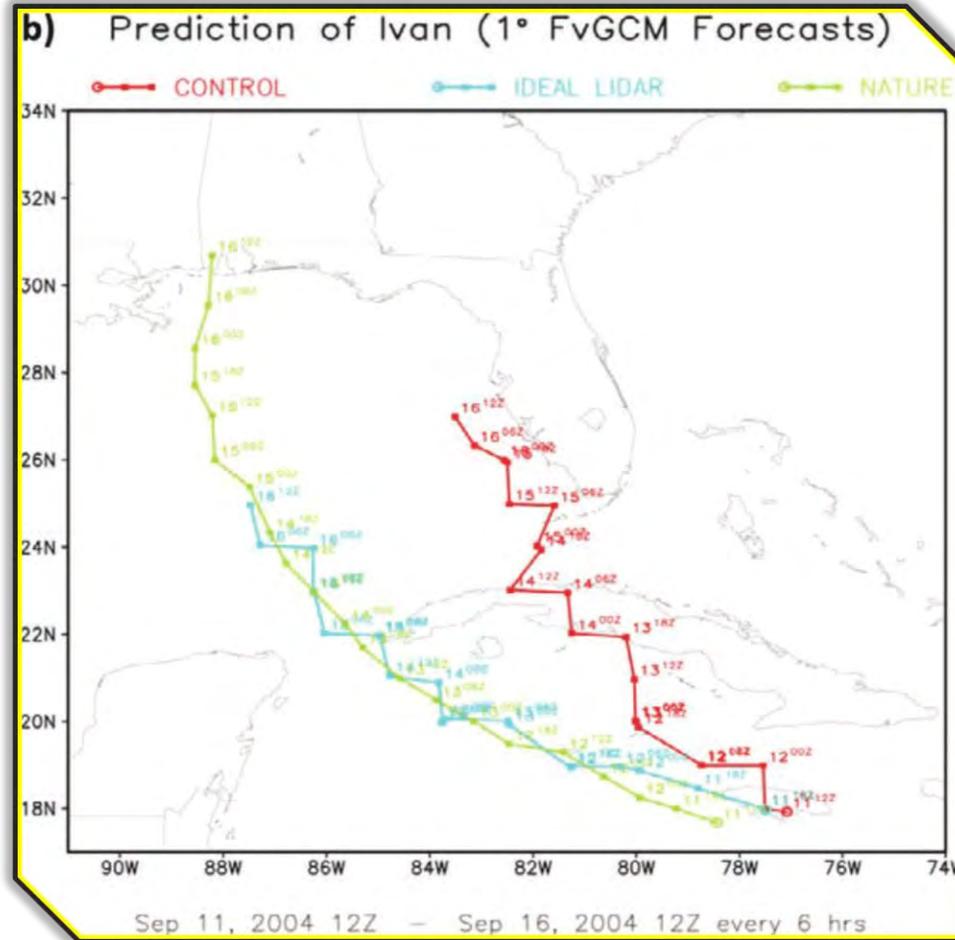
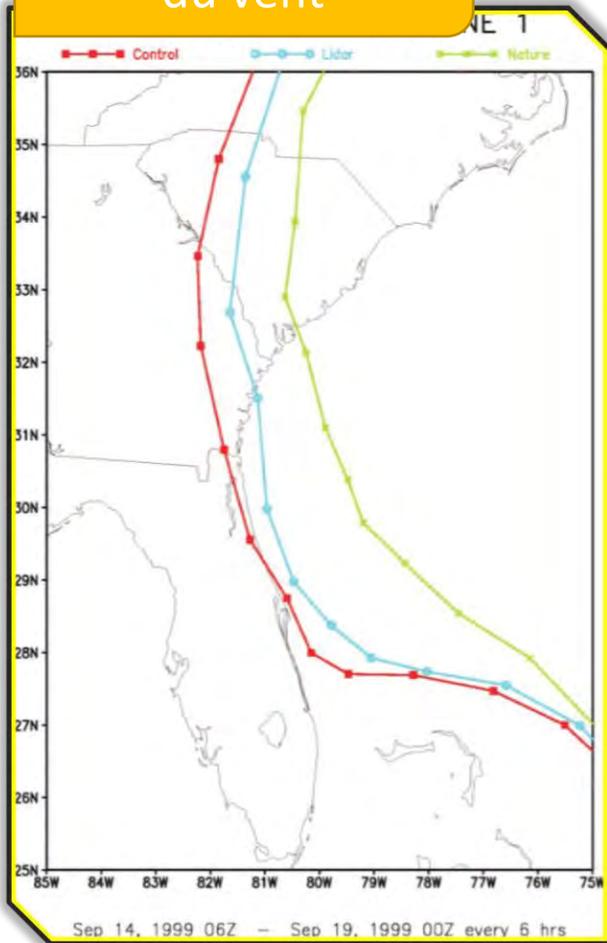


Le rouge indique que le vent soufflant d'est en ouest (est) et le bleu indique un vent soufflant d'ouest en est (vents d'ouest). Comme Aeolus mesure le vent dans l'atmosphère sans nuages, et dans les nuages minces et non au-dessus des nuages épais, les mesures ici sont celles qui entourent le cyclone 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.



Evaluer la vitesse du vent

Technologies spatiales



L'impact potentiel des vents mesurés par lidar pour les prévisions de trajectoire d'ouragan. Le vert indique la trajectoire « observée », le rouge indique la prévision avec toutes les données simulées actuellement utilisées et le bleu indique la prévision améliorée pour la même période avec des données lidar de vent simulées ajoutées.



Évaluer la vitesse des vents

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

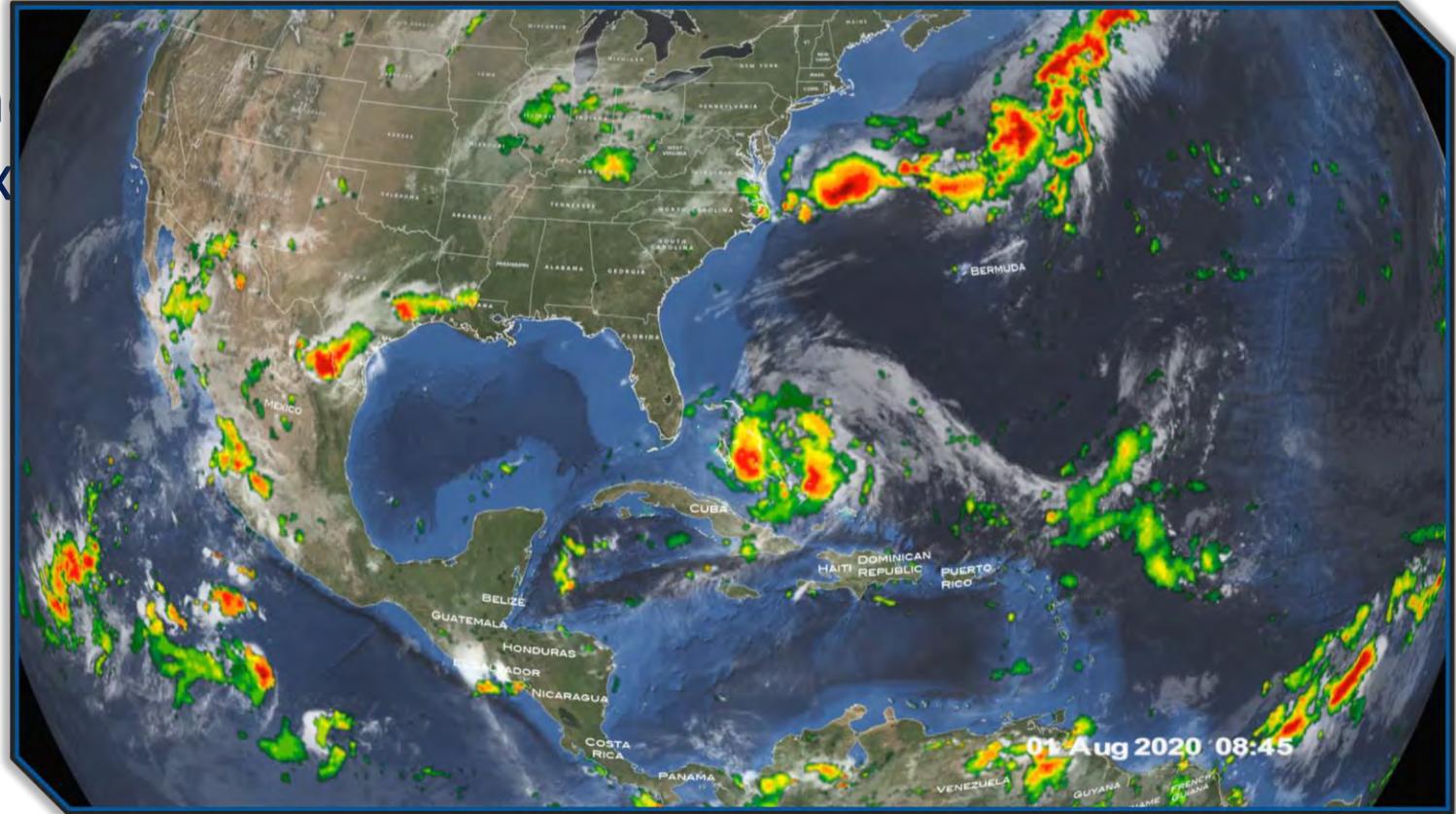
La compréhension des facteurs à l'origine de ces profils permettra de progresser sur l'évolution future d'un facteur décisif pour la pérennité d'un cyclone : le cisaillement des vents



Quantifier les
précipitations associées

Les précipitations et les cyclones

Les précipitations constituent un
menace importante associée aux
cyclones



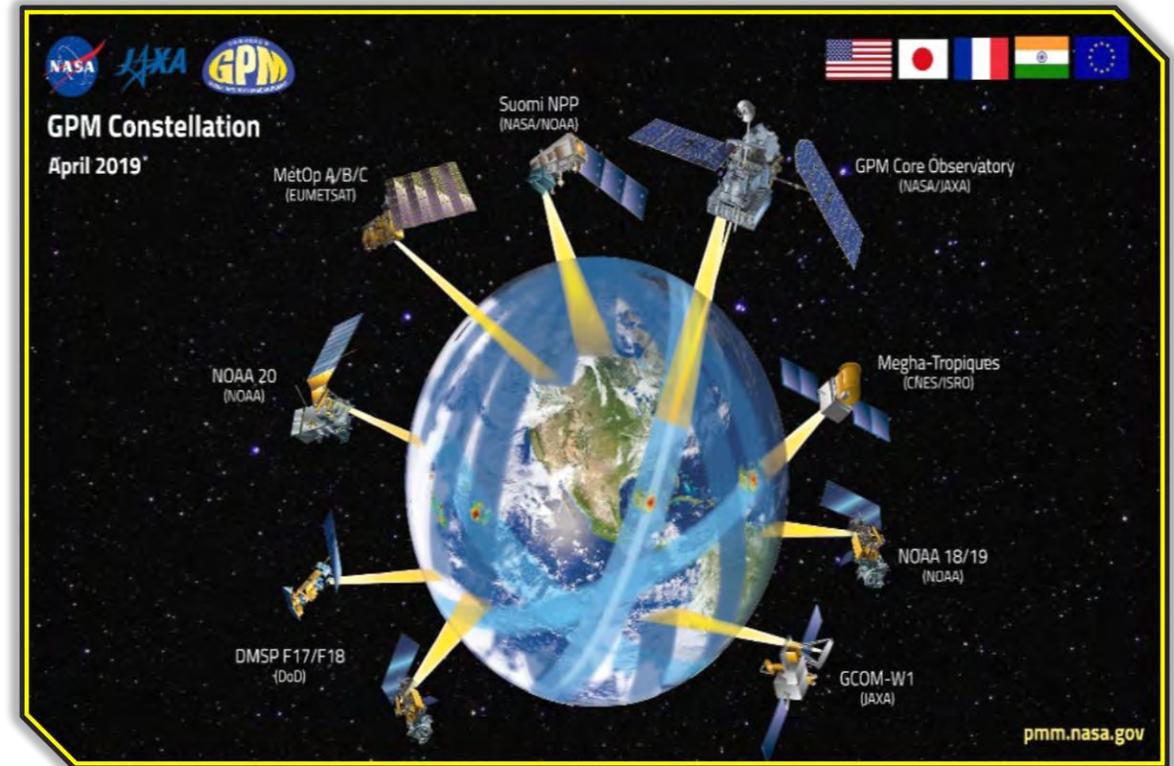


Quantifier les précipitations associées

Technologies spatiales

GPM est une mission satellite internationale de mesures des précipitations à partir de capteurs de micro-ondes.

Le concept de mission GPM est centré sur le satellite GPM « Core » utilisées pour calculer des estimations cohérentes des précipitations de cette constellation de satellites fournies par un consortium de partenaires internationaux.





Quantifier les précipitations associées

Technologies spatiales

GPM s'appuie sur des mesures passives et actives pour mesurer les propriétés des précipitations.

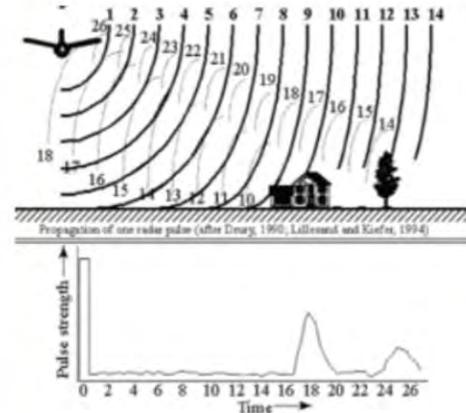
- Le Radar actif de précipitation à double fréquence (DPR) transmet et reçoit des signaux réfléchis. Le signal retourné au récepteur radar (appelé réflectivité radar) fournit une mesure de la taille et du nombre de gouttes de pluie et de neige sur plusieurs couches verticales dans le nuage.
- Les radiomètres de précipitations passives (GMI) mesurent le rayonnement thermique naturel (appelé températures de brillance) à partir de la scène complète

Les valeurs des précipitations sont estimées à l'aide d'algorithmes de transformation des réflectivités radar (Z) et des températures de brillance (TB).

Remote Sensing Fundamentals

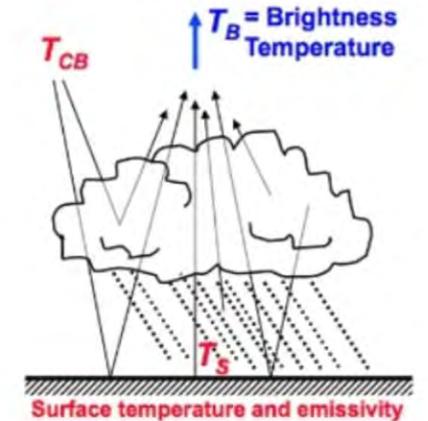
Active Remote Sensing

Source: Instrument pulse,
Needs power to operate



Passive Remote Sensing

Sources: surface emission,
cosmic background,
rain emission





Quantifier les précipitations associées

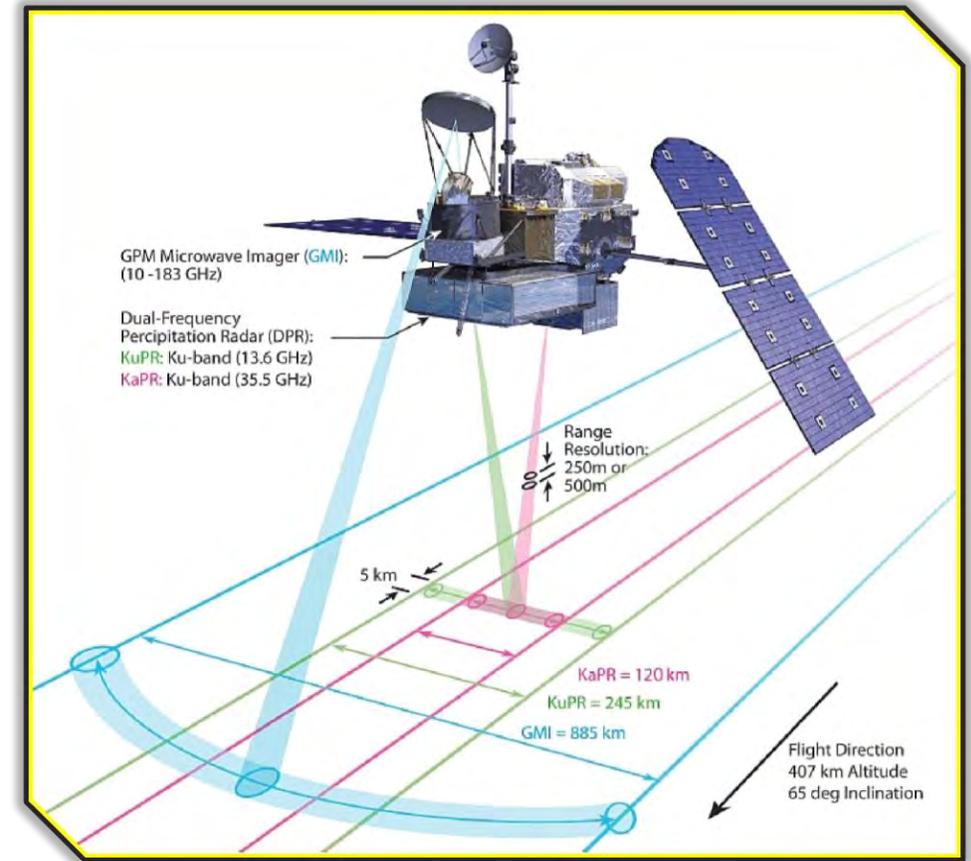
Technologies spatiales

La fonction des radars de précipitations est de fournir la structure tridimensionnelle des précipitations

Les mesures radar fournissent une relation presque directe entre les réflectivités radar et les caractéristiques physiques de la pluie et de la neige dans un nuage.

Le radar de précipitations à double fréquence GPM a deux fréquences de sorte que la taille de la chute et la distribution des gouttes peuvent être récupérées.

L'algorithme nécessite des hypothèses et des corrections pour récupérer la structure des précipitations, notamment pour corriger l'atténuation. L'atténuation se réfère à l'affaiblissement d'un signal radar à mesure qu'il s'éloigne de l'émetteur et est dispersé, réfléchi et absorbé par les précipitations et d'autres particules atmosphériques.





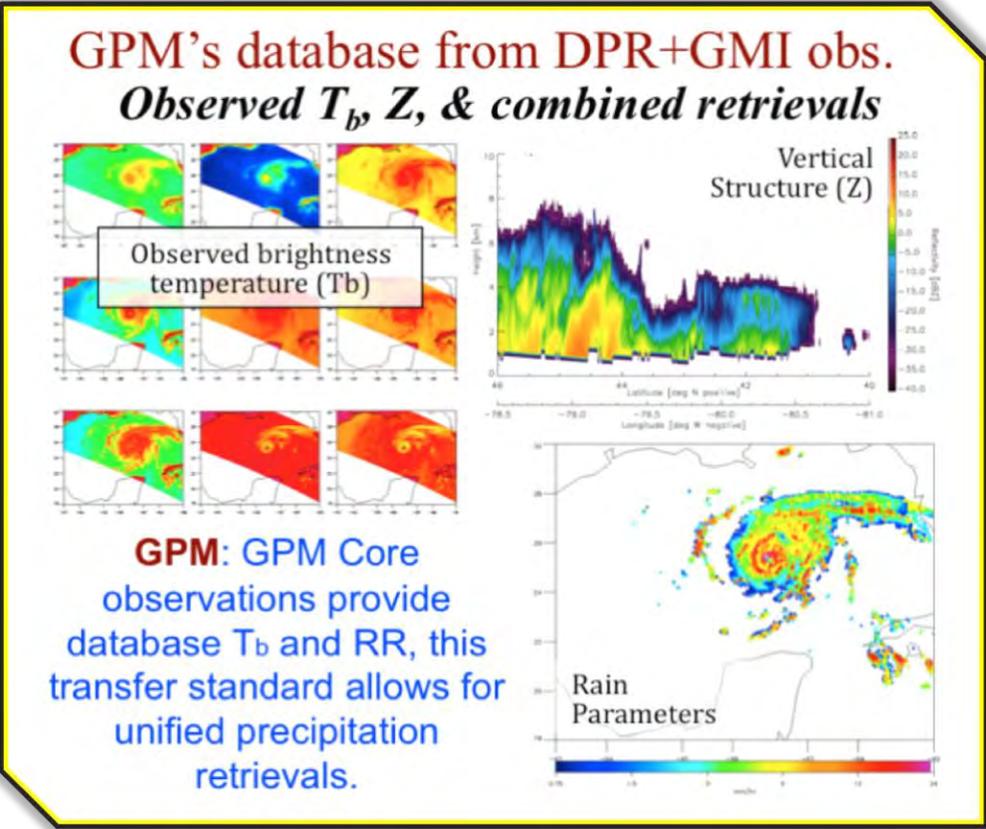
Quantifier les précipitations associées

Technologies spatiales

Les radiomètres de précipitations offrent des degrés supplémentaires de liberté pour interpréter la pluie et la neige dans les nuages grâce à l'utilisation de fréquences passives multiples.

Quand il y a de la pluie liquide dans la colonne nuageuse, les canaux à basse fréquence répondent ; lorsqu'il y a de la neige, les canaux à haute fréquence réagissent ; lorsqu'il y a de l'air clair, les températures de brillance réagissent à l'émission de surface.

L'utilisation combinée de données de capteurs à micro-ondes actifs et passifs coïncidentes fournit des informations complémentaires sur les processus macro et microphysiques des nuages précipitants qui peuvent être utilisés pour réduire les incertitudes dans les algorithmes combinés de récupération radar/radiomètre.



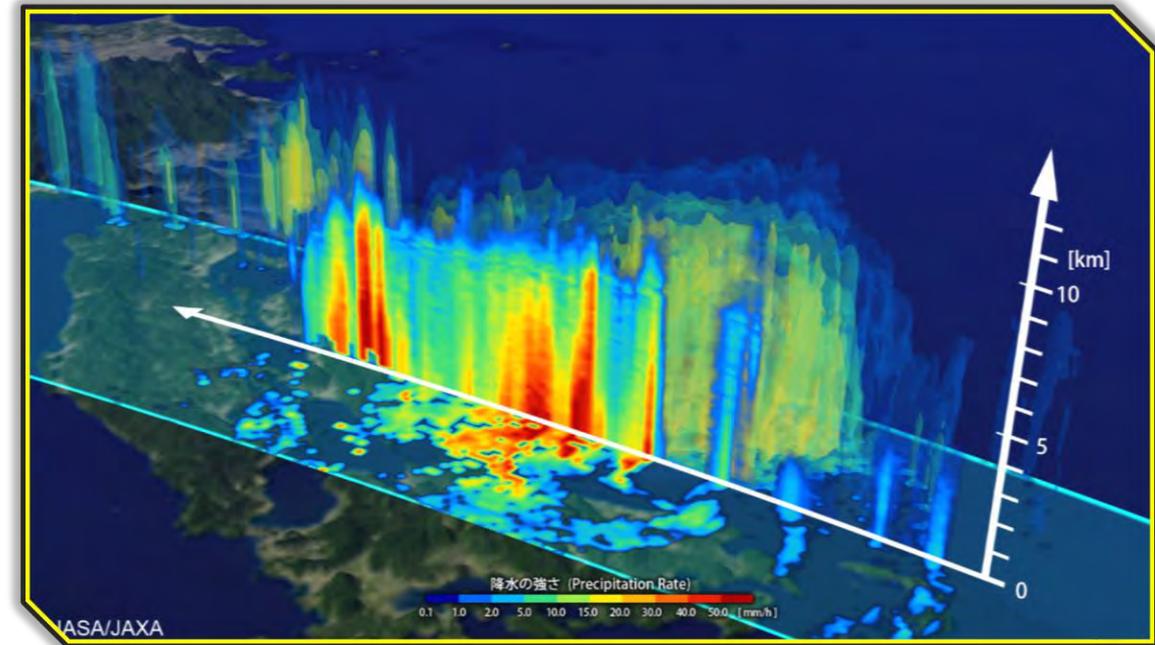


Quantifier les
précipitations associées

Technologies spatiales

En plus du satellite GPM, de nombreux autres satellites possèdent des capteurs pertinents pour les précipitations.

L'objectif des algorithmes multisatellites est d'utiliser toutes les estimations de précipitations quasi-mondiales disponibles calculées à partir de cette constellation internationale de satellites pour créer un produit de précipitations à haute résolution avec une couverture complète sur le domaine choisi et la période d'enregistrement.





Quantifier les précipitations associées

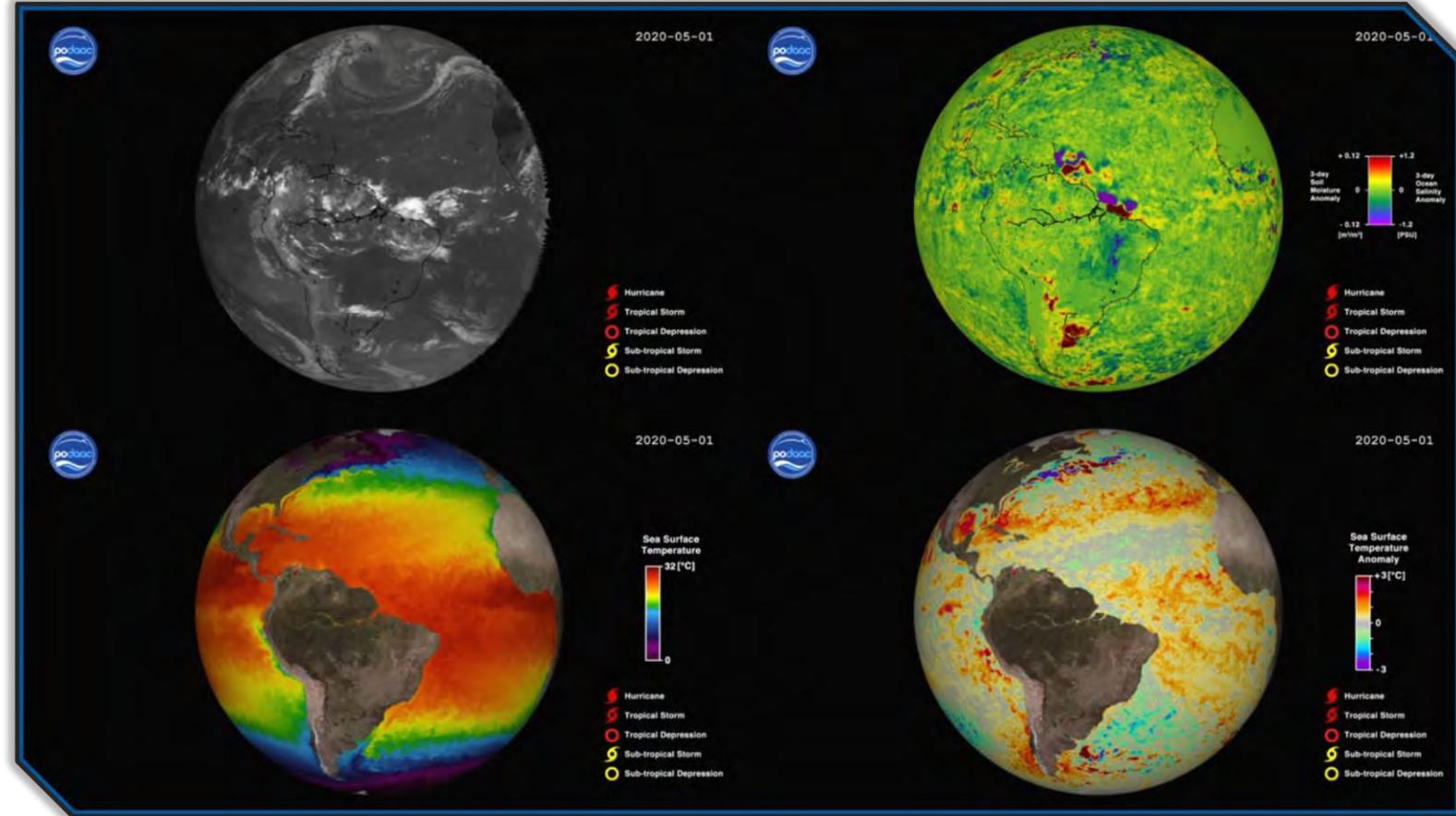
L'observation de la distribution des précipitations et surtout du profil vertical permet d'explorer la structuration du cyclone

La quantification des précipitations est importante car elle permet d'anticiper d'éventuels impacts dans le cas de cyclone atteignant la côte



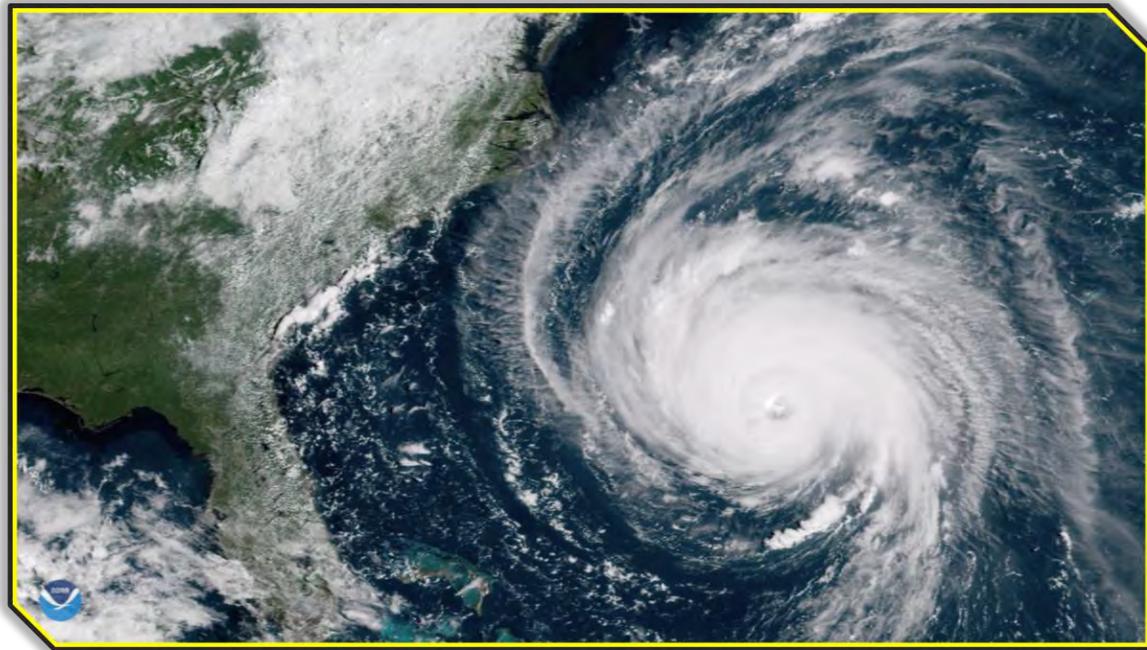
Une somme d'information issue de des technologies spatiales

- Les technologies spatiales permettent donc un moyen d'étude extraordinaire pour comprendre la formation, les caractéristiques et l'évolution des cyclones
- Ces apports scientifiques sont indispensable pour lever les incertitudes et améliorer les modélisations pour prévoir l'évolution en lien avec le changement climatique de l'activité cyclonique





Observer les cyclones



© NASA

Des pistes pédagogiques...

Données très disponibles, exploitables en documents ou en affichage sur un visualisateur en cas de géoréférencement

Possibilité d'afficher les cyclones et de calculer :

- L'extension géographique du cyclone
- Sa vitesse de déplacement

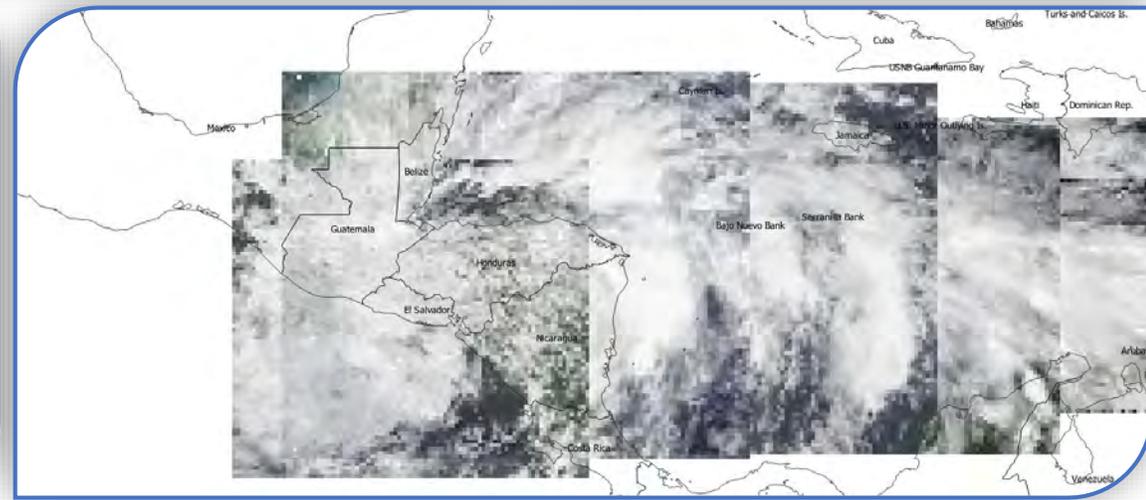
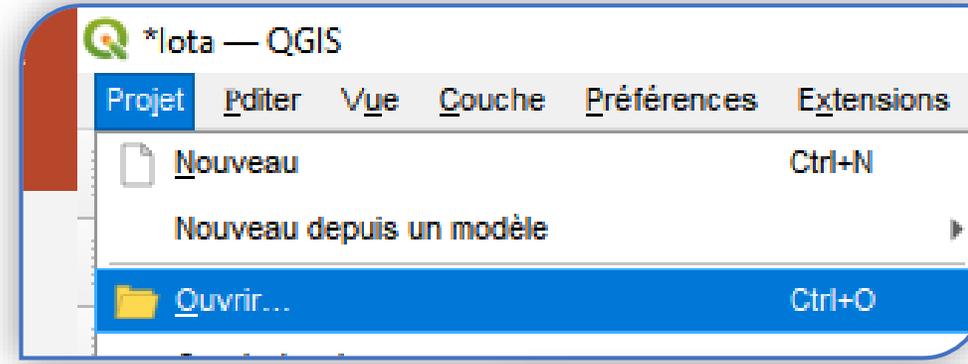
Cumuler des observations sur une période définie pour effectuer des statistiques

- Fréquence des événements cycloniques
- Zone de formation préférentielle
- Trajectoires privilégiées



Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

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



Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone



Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

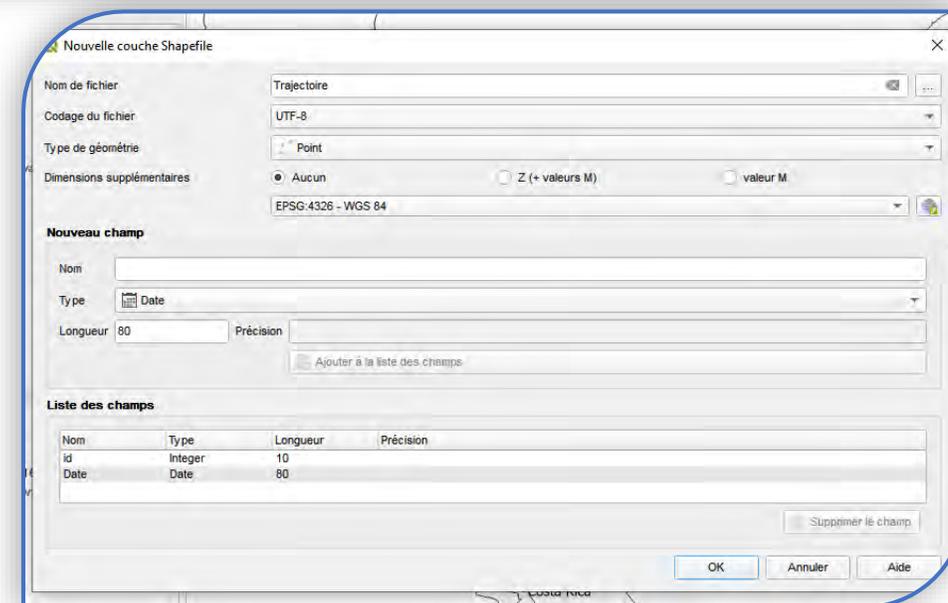
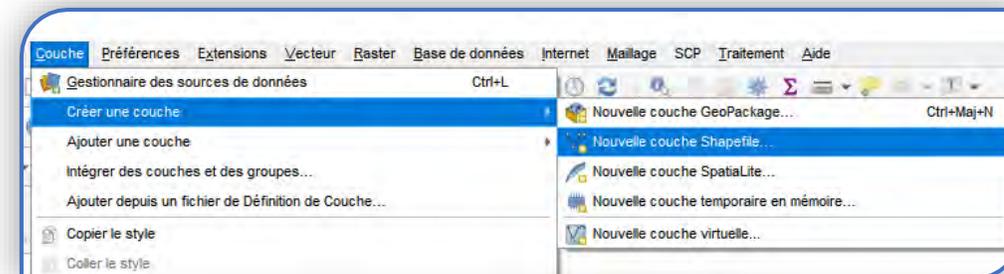
On va matérialiser la position du cyclone aux différentes dates en créant un fichier vectoriel

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 crée 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 apparait dans la colonne de gauche



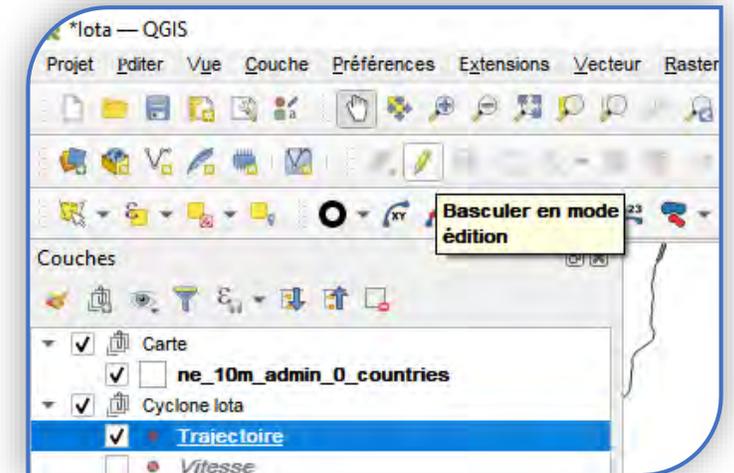
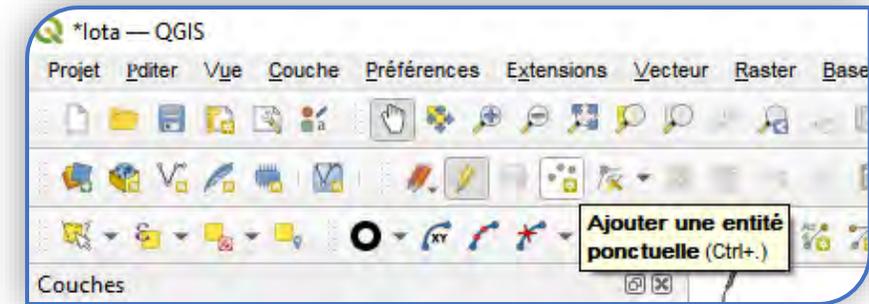
Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone



Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

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'outil sur l'icône (petit crayon) **Basculer en mode édition**.
8. Dans les nouveaux icônes actifs, sélectionner **Ajouter une entité ponctuelle**

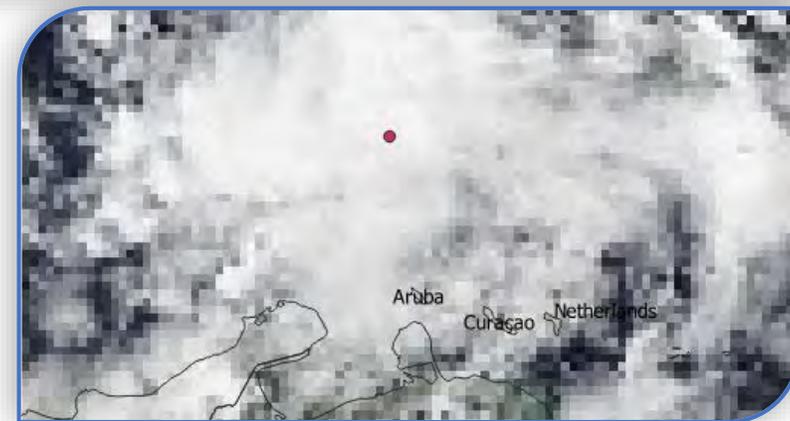
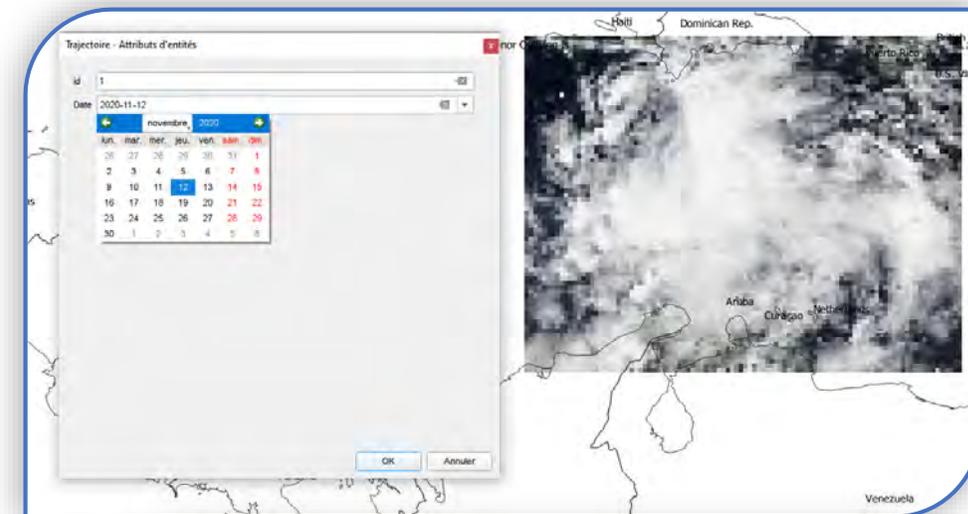


Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone

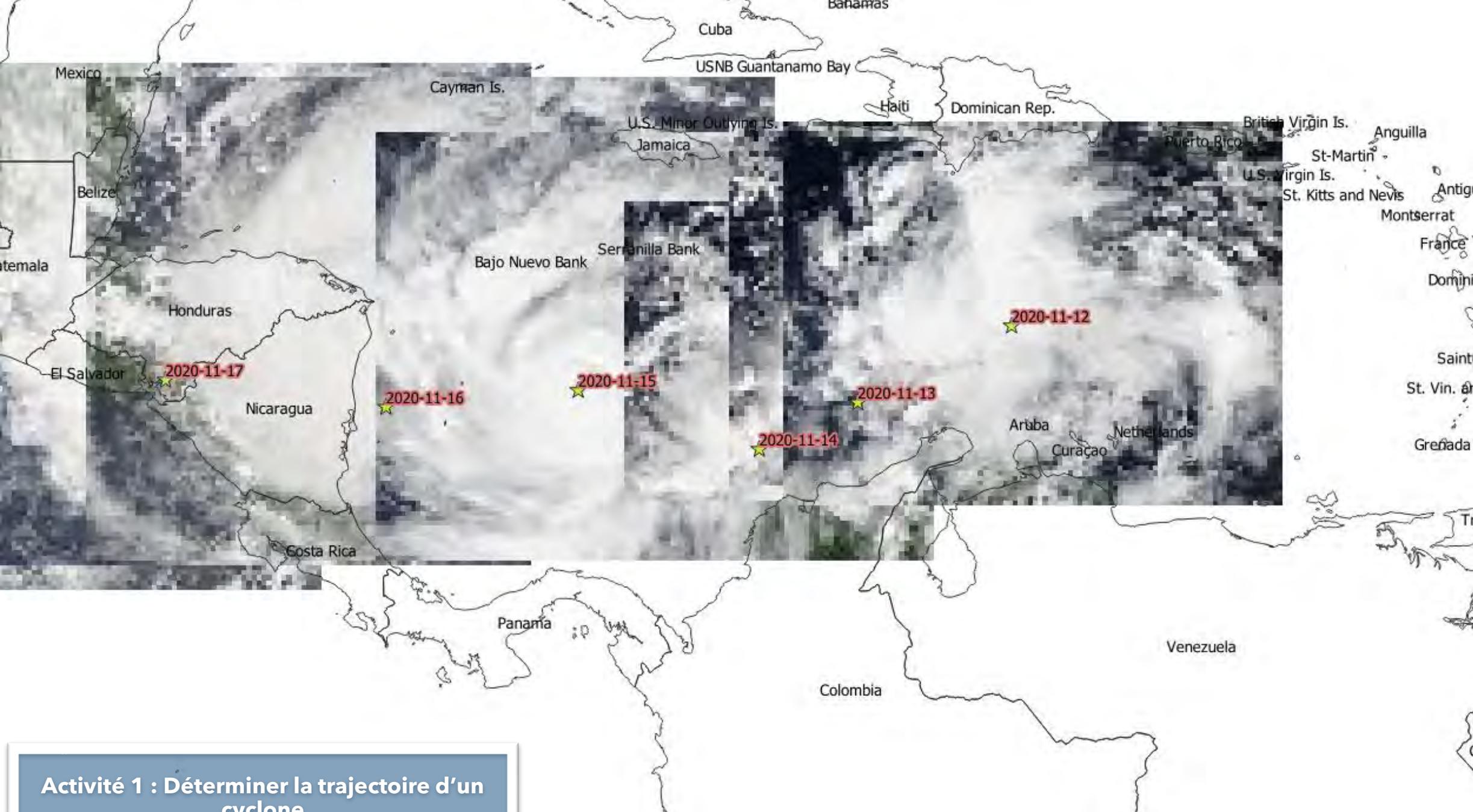


Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

- Afficher uniquement l'image satellite SUOMI d'une date en utilisant les outils de visibilité
- A partir de cette image, repérer l'œil du cyclone, et cliquer sur l'image dans la zone en question
- Dans la fenêtre qui s'ouvre :
 - Donnez une valeur (1 par exemple pour la première date) dans la fenêtre **Id**
 - Choisir la date dans la fenêtre **Date**
- Procéder de la même manière pour les différentes dates
- Quitter le mode édition en cliquant dans la barre d'outil sur l'icône (petit crayon) **Basculer en mode édition**.



Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone

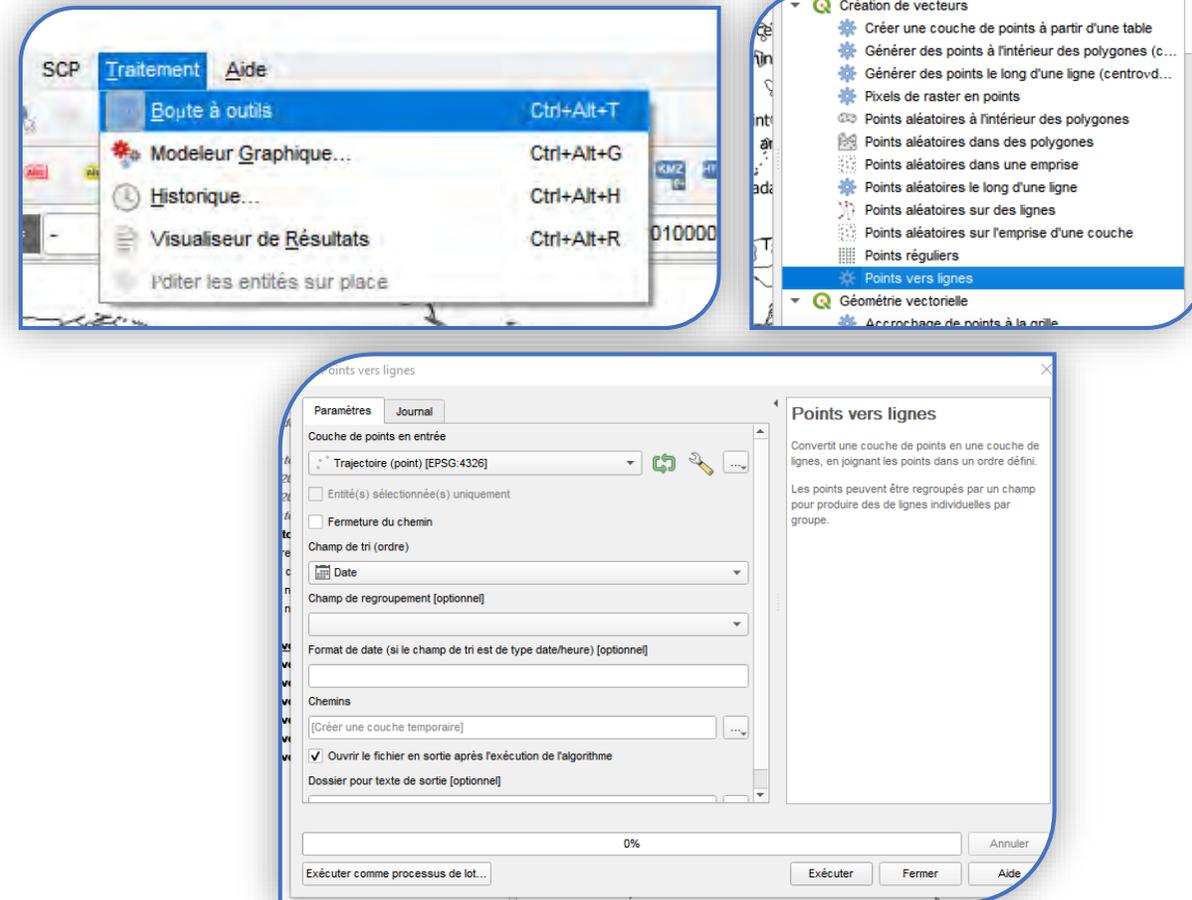


Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone

Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

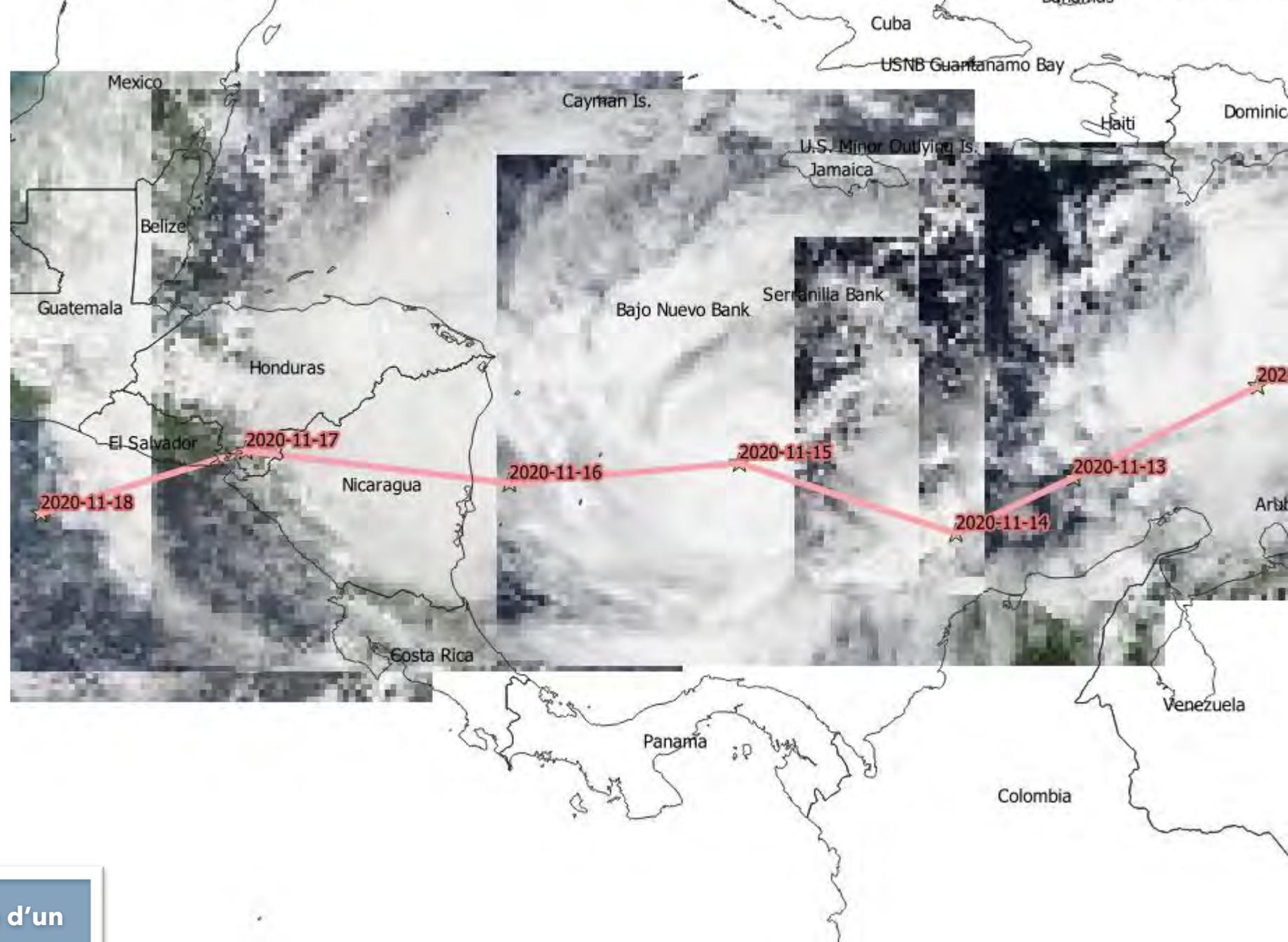
On va ensuite générer une nouvelle couche vectorielle mais cette fois ci sous la forme d'une ligne matérialisant la trajectoire passant par les différents points préalablement définis dans la couche vectorielle précédente (trajectoire)

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**



Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone

- ✓ — Trajectoire (ligne)
- ✓ ☆ Trajectoire (point)



Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone

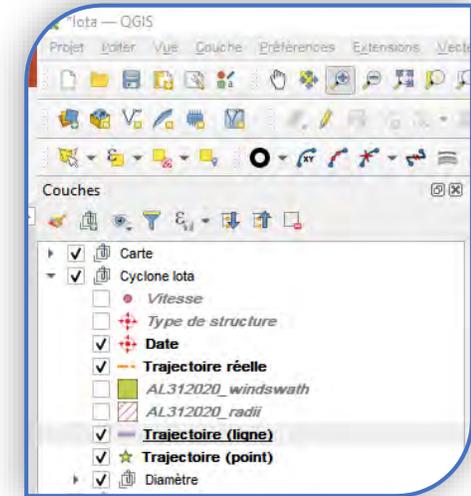


Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

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

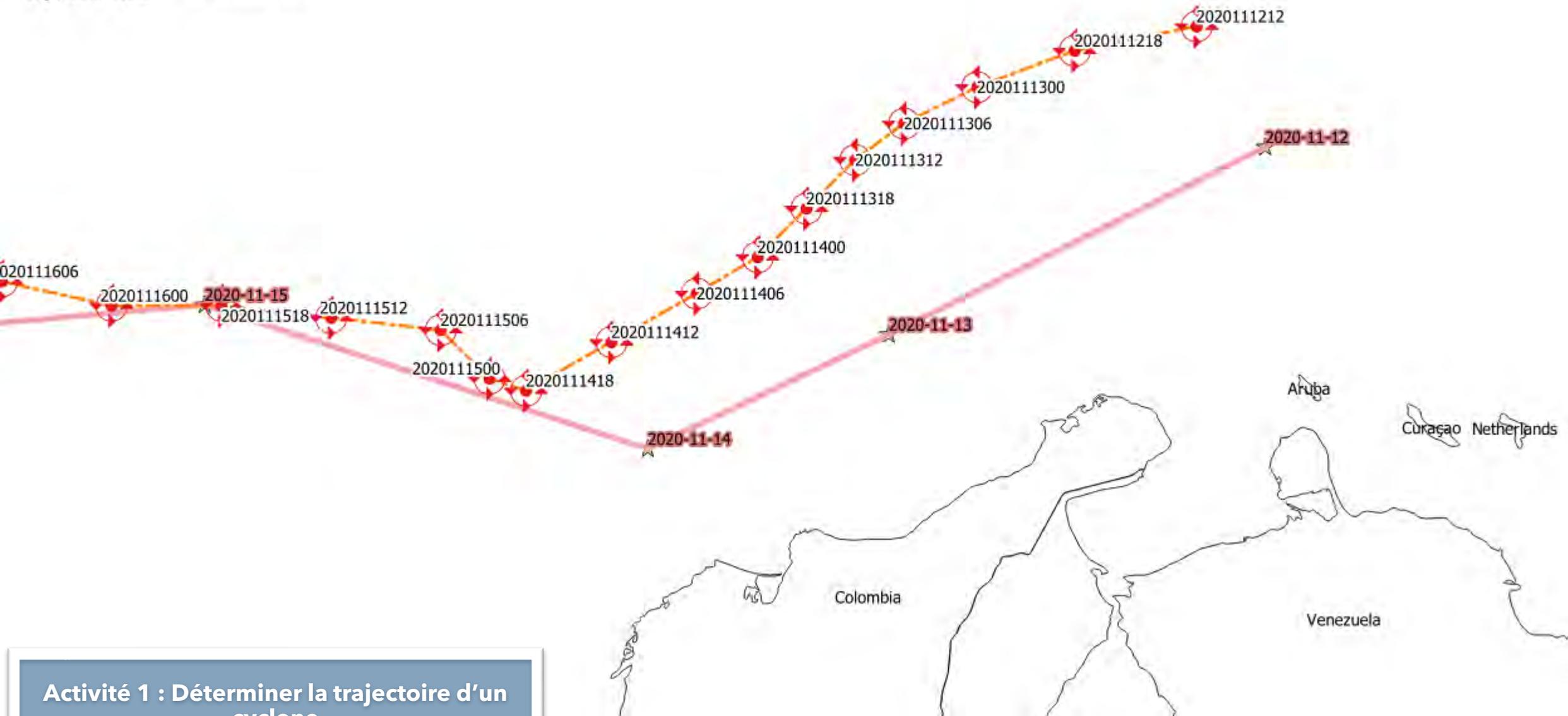
18. Comparer cette trajectoire avec la votre



Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone

Bajo Nuevo Bank

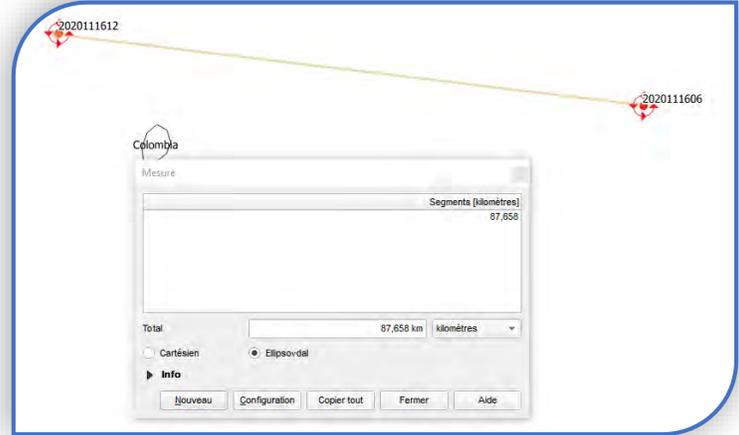
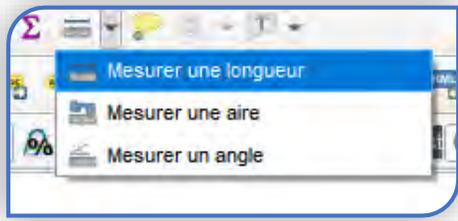
Serranilla Bank



Activité 1 : Déterminer la trajectoire d'un cyclone

Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

1. Rendre invisibles les couches trajectoires et trajectoires (ligne)
2. Utiliser l'outil **Mesurer une longueur** après avoir cliqué sur l'icône **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



ORMNAME	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	21,7

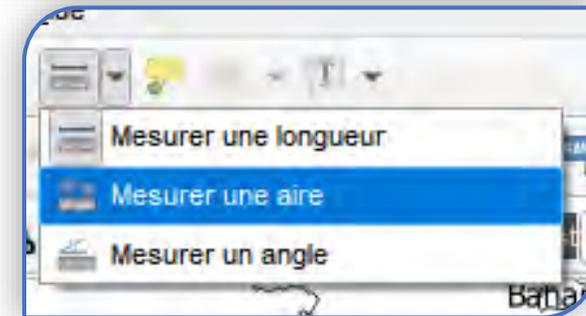
Activité 2 : Vitesse de déplacement d'un cyclone



Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

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

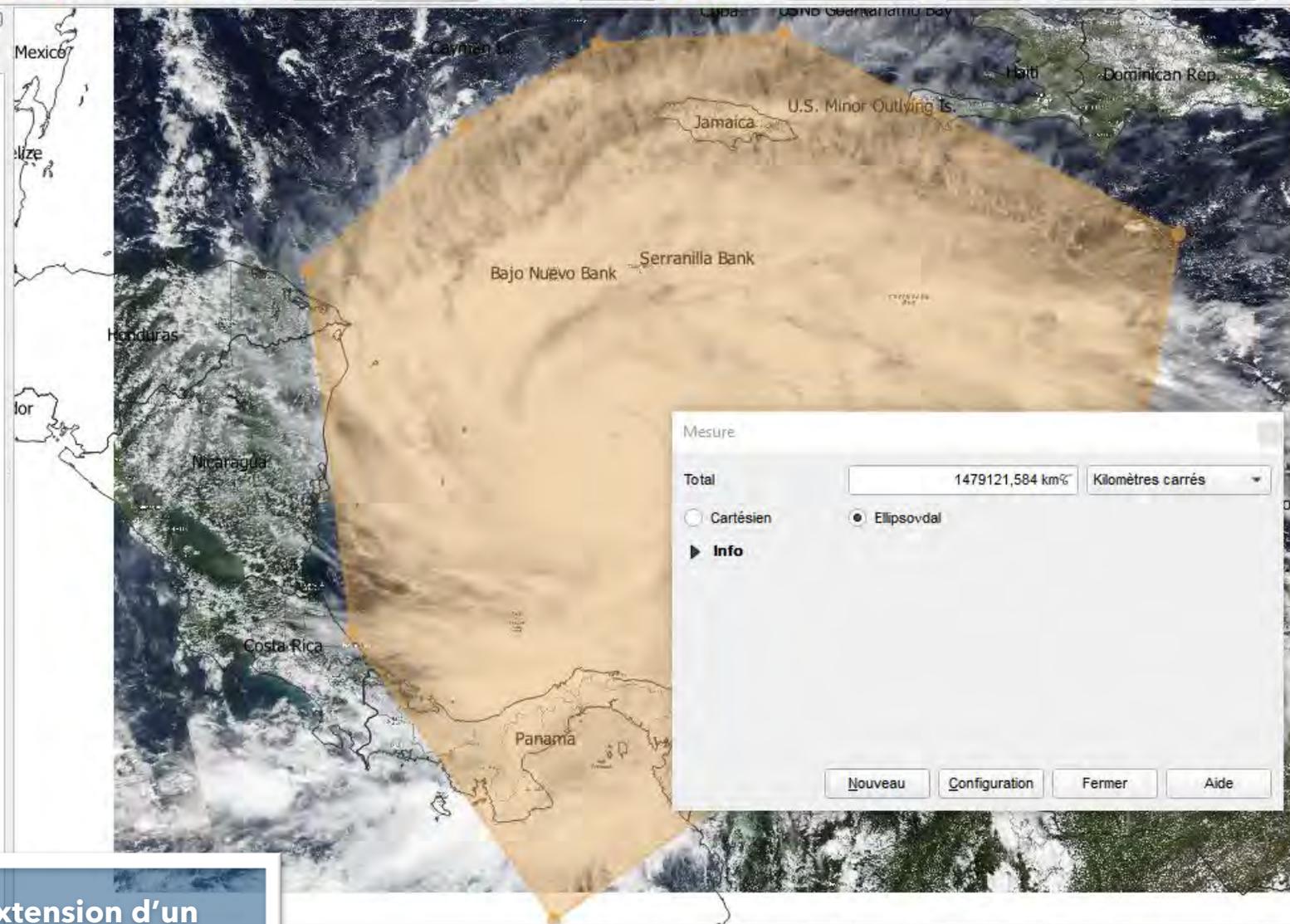
- 14 novembre true colors
- 15 novembre true colorsGP
- 15 novembre true colors
- 16 novembre true colors
- 16 novembre précipitations
- 16 novembre windspeed
- 16 novembre SST
- 17 novembre true colors
- 17 novembre true colorsGP



Activité 3 : Mesurer l'extension d'un cyclone

Couches

- ✓ Carte
- ✓ Cyclone Iota
- ✓ WorldView capture
- 14 novembre true colors
- 15 novembre true colorsGP
- ✓ 15 novembre true colors
- 16 novembre true colors
- 16 novembre précipitations
- 16 novembre windspeed
- 16 novembre SST
- 17 novembre true colors
- 17 novembre true colorsGP
- Sentinel 15 novembre
- Sentinel 16 novembre
- Suomi
- Terra
- SST
- Exercice



Activité 3 : Mesurer l'extension d'un cyclone



Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

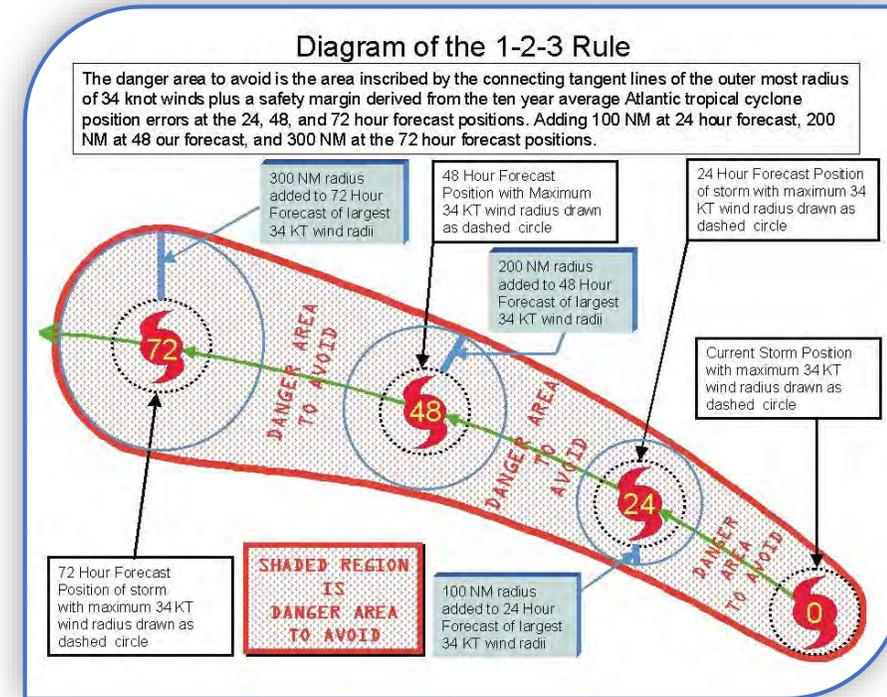
Le pouvoir destructeur des cyclones est lié aux vitesses des vents au sein de la structure.

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 MRW 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.



Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone



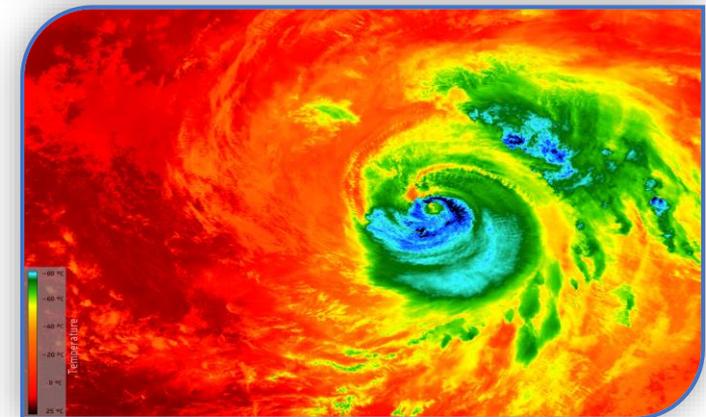
Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

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.

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. 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.



Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone



Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

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 compactes

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

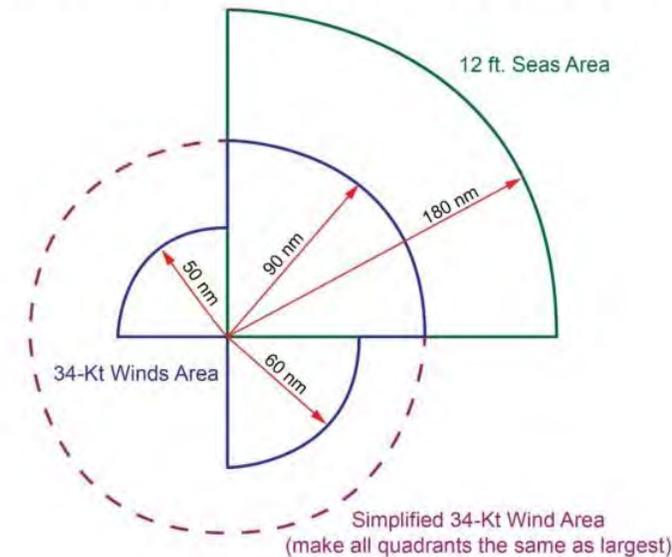
 MAX SUSTAINED WINDS 45 KT WITH GUSTS TO 55 KT.

 34 KT..... 90NE 60SE 0SW 50NW.

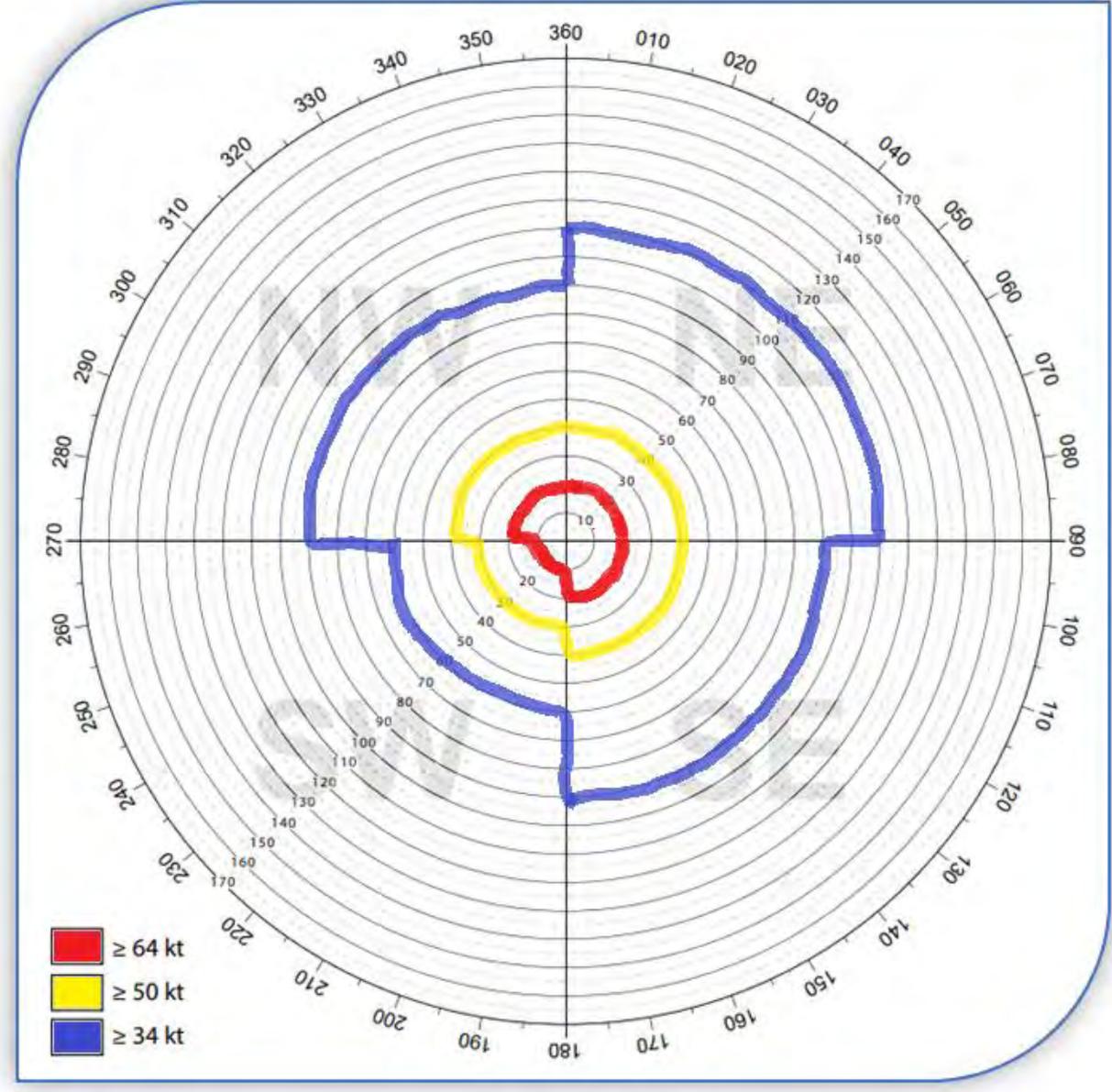
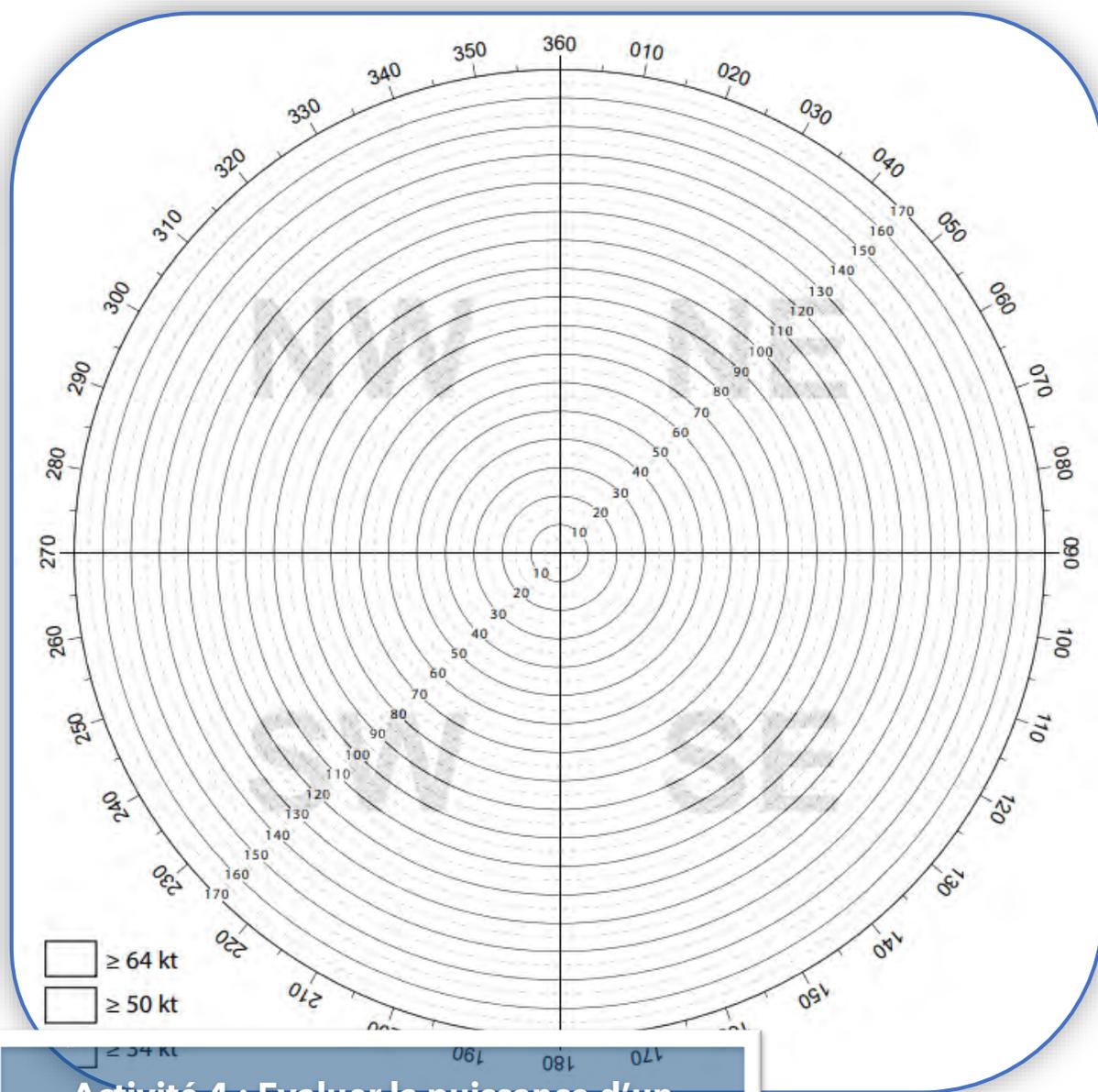
 12 FT SEAS..180NE 0SE 0SW 0NW.

 WINDS AND SEAS VARY GREATLY IN EACH QUADRANT. RADII IN NAUTICAL

 MILES ARE THE LARGEST RADII EXPECTED ANYWHERE IN THAT QUADRANT.



Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone



Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone

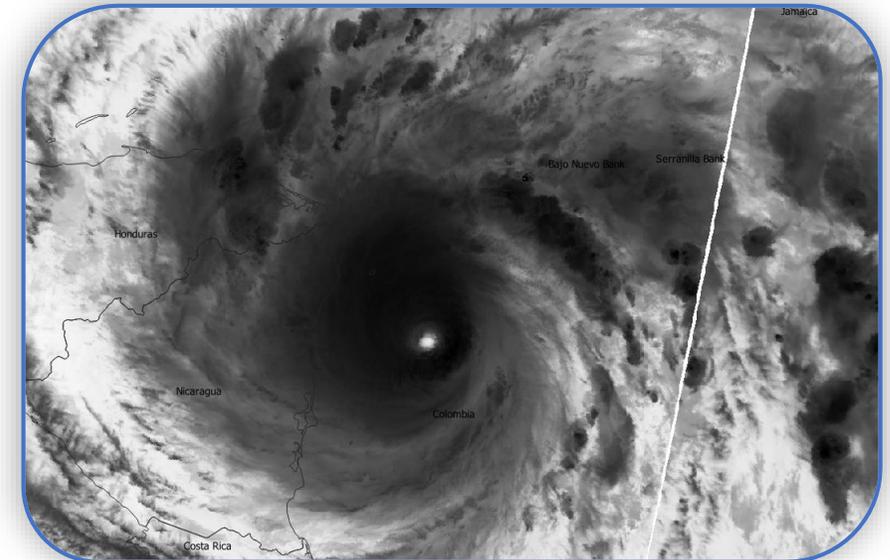


Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

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)

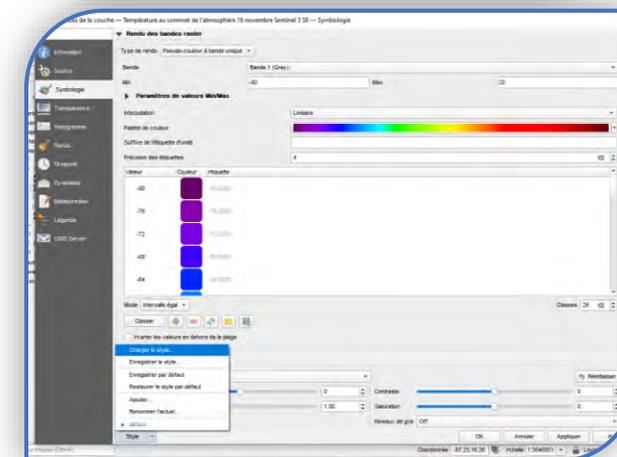
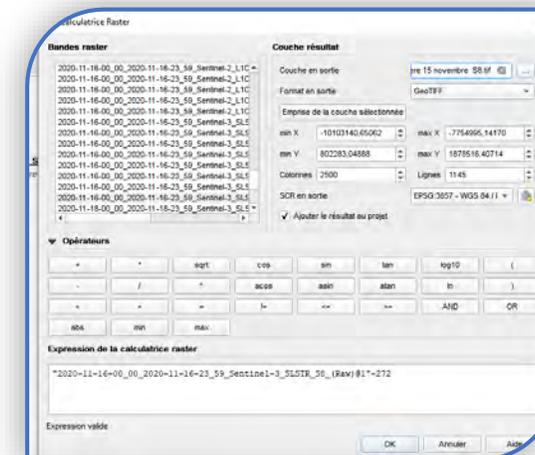


Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone

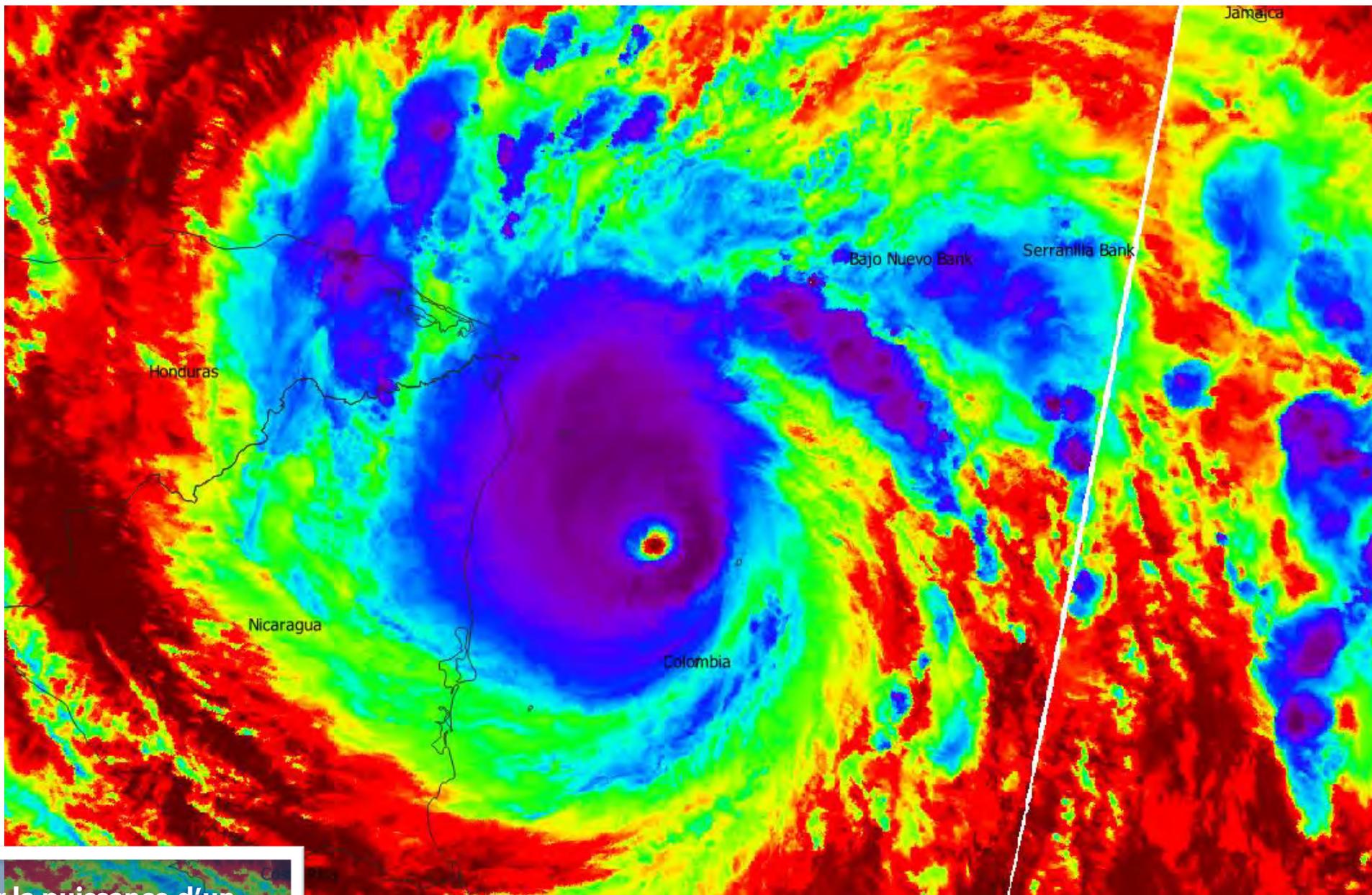
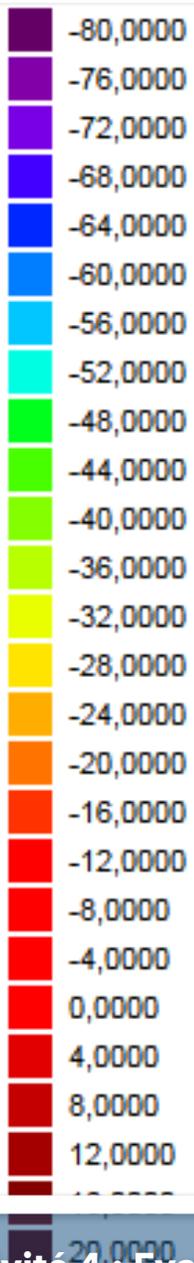


Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

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



Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone



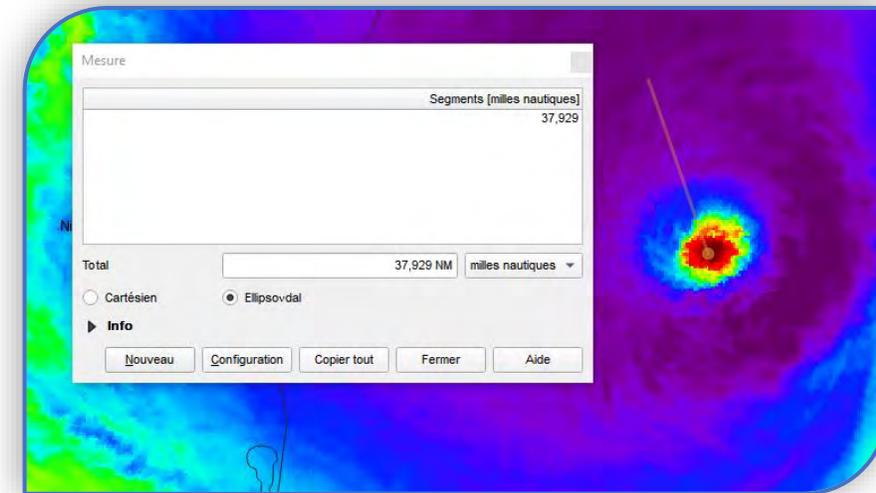
Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone



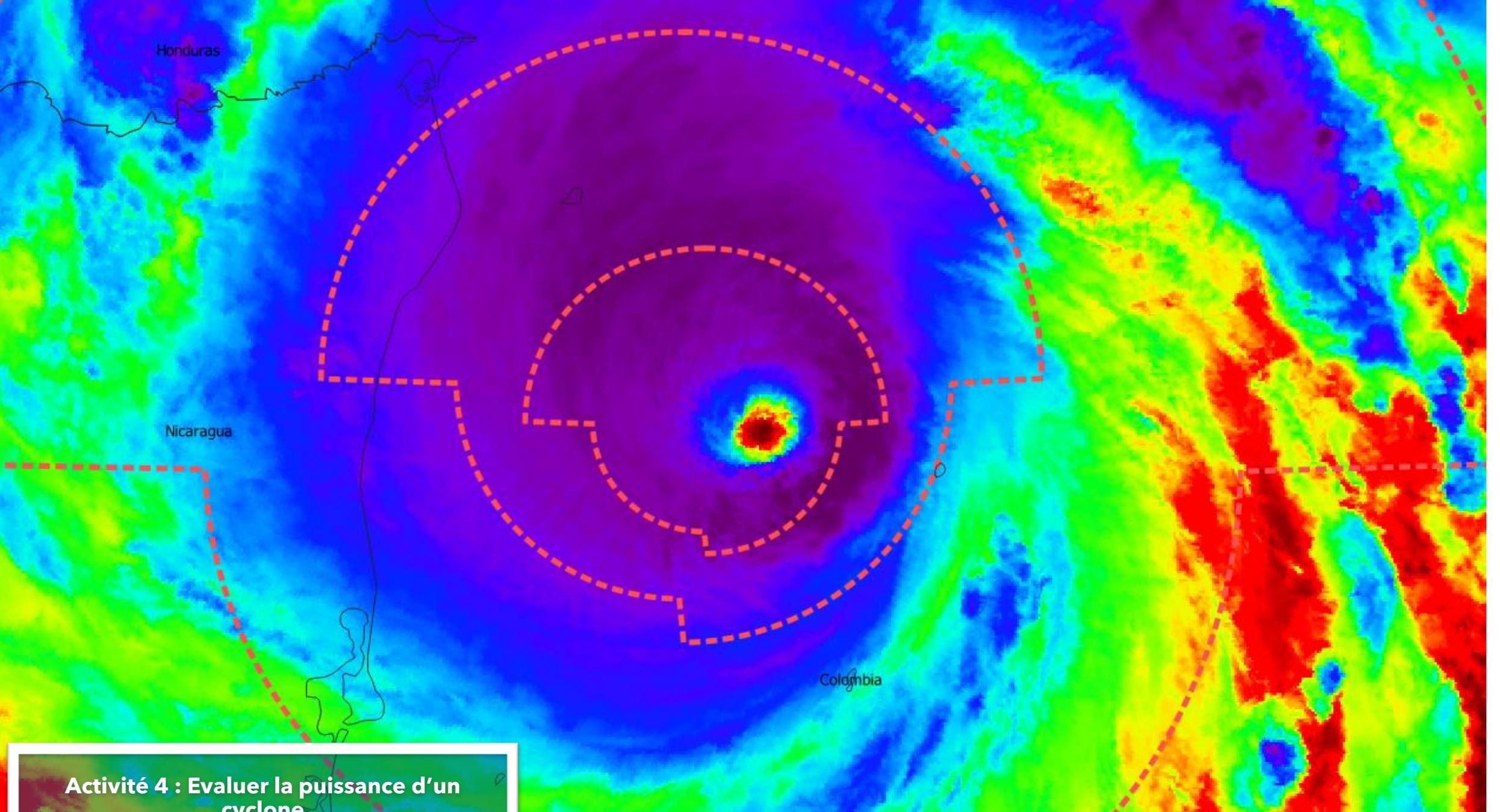
Exemple d'utilisation de données : Suivi du cyclone Iota (2020)

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 cliqué 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



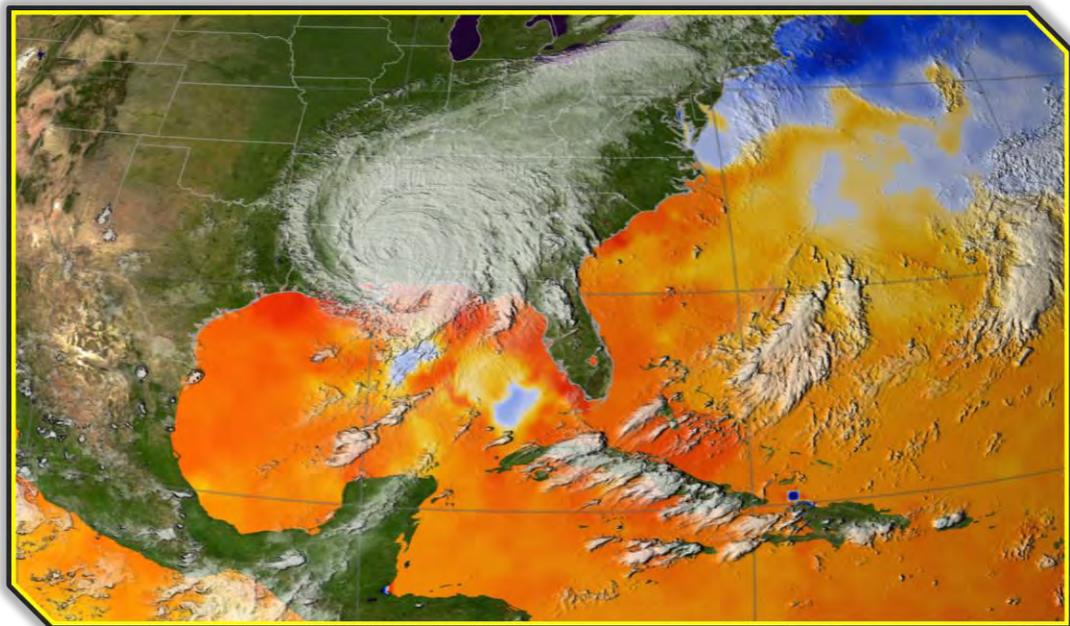
Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone



Activité 4 : Evaluer la puissance d'un cyclone



Mesurer la température de surface des océans



Des pistes pédagogiques...

Données 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

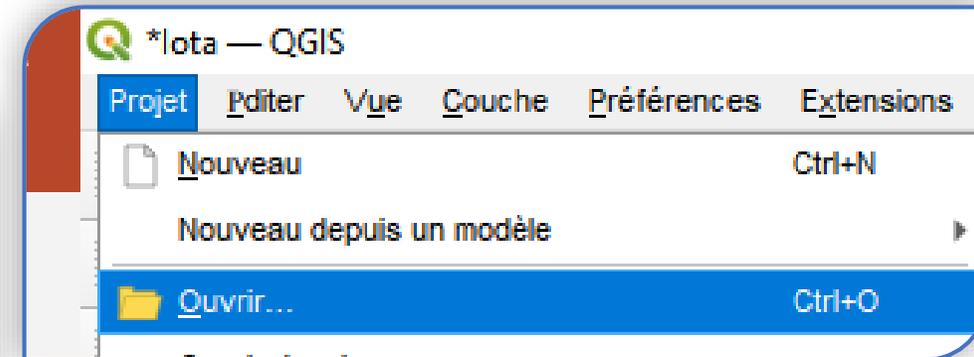
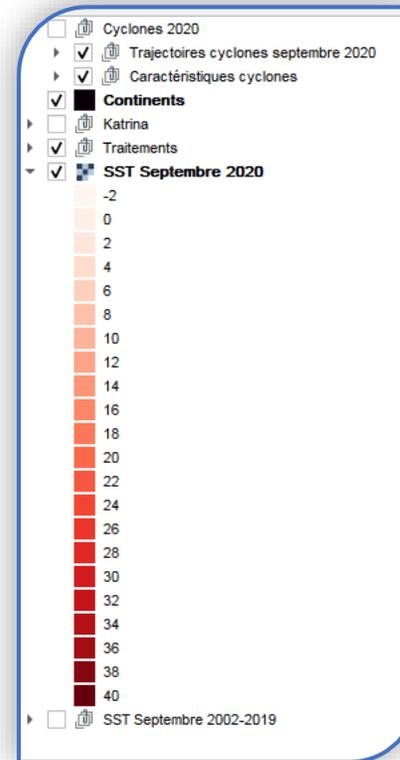
Ex : Il est possible de superposer 10 années de mesure d'une même région océanique un même mois d'une région et de faire calculer une température de surface moyenne puis d'ajouter une nouvelle année, et d'effectuer la comparaison pixel par pixel entre cette année et la valeur moyenne préalablement calculée.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



Exemple d'utilisation de données : Température de surface des océans

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

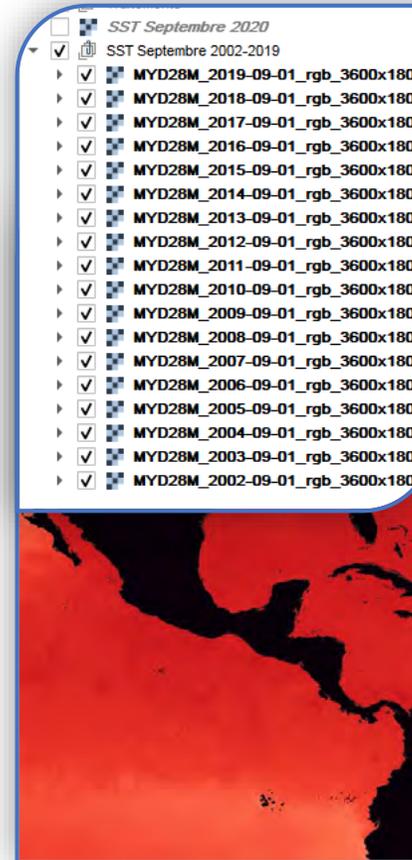


Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



Exemple d'utilisation de données : Température de surface des océans

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



Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



Exemple d'utilisation de données : Température de surface des océans

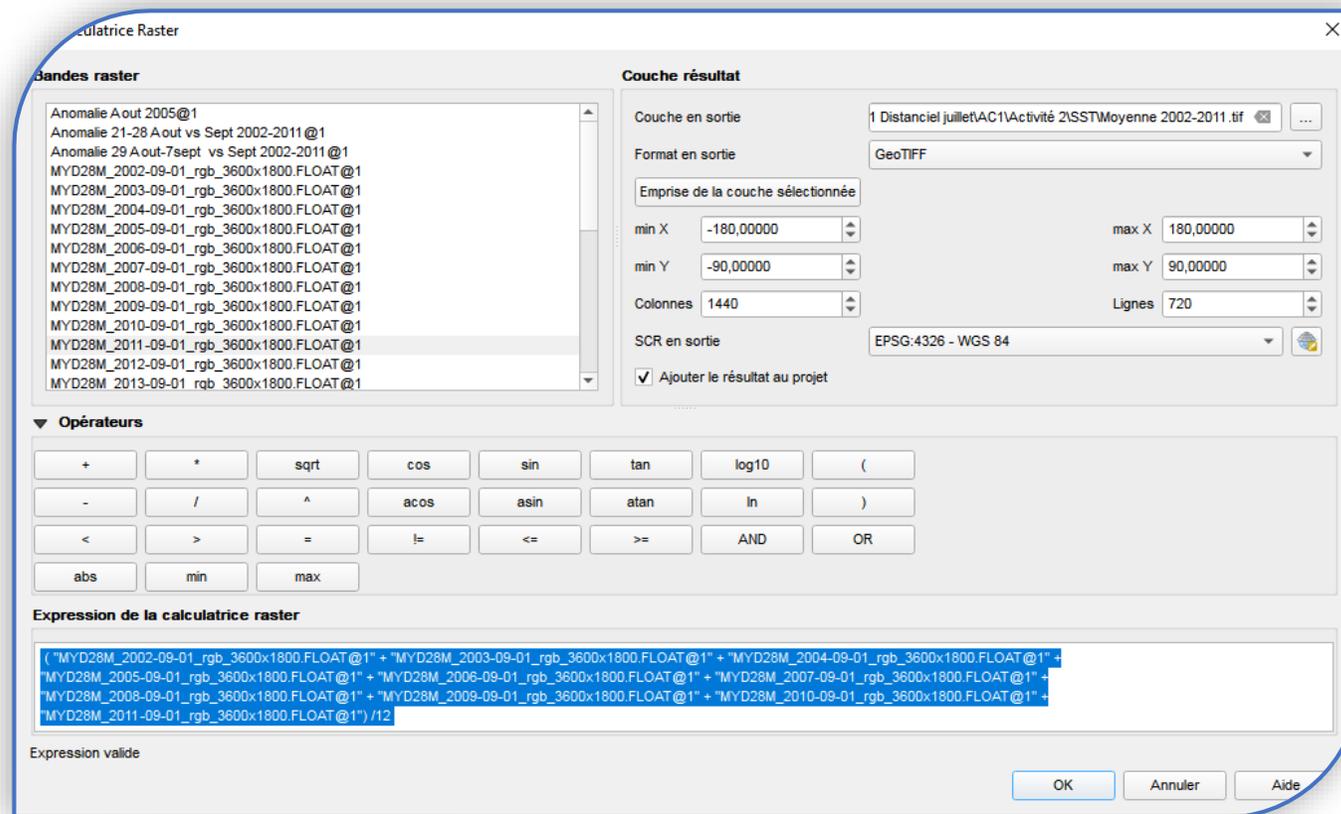
3. Aller dans **RASTER** puis **CALCULATRICE RASTER**.

- 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

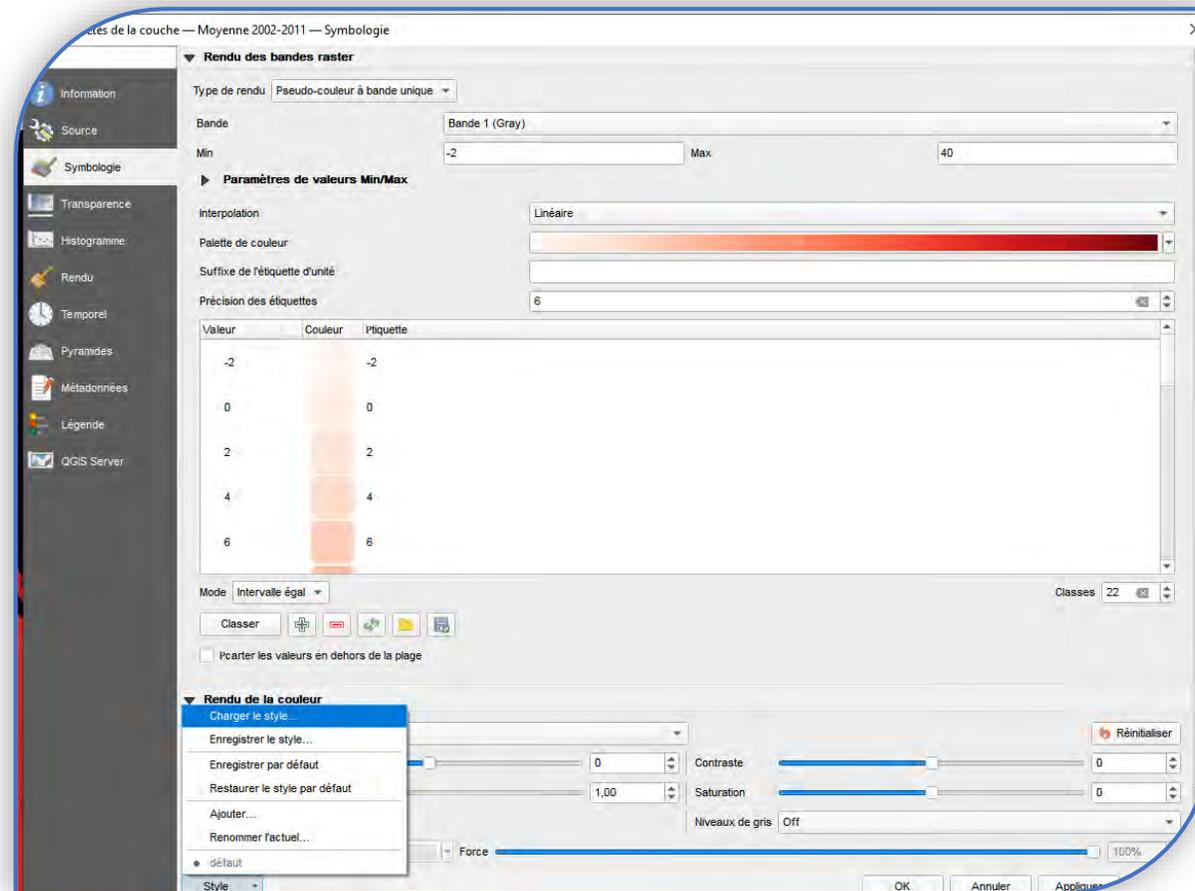


Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



Exemple d'utilisation de données : Température de surface des océans

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



Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



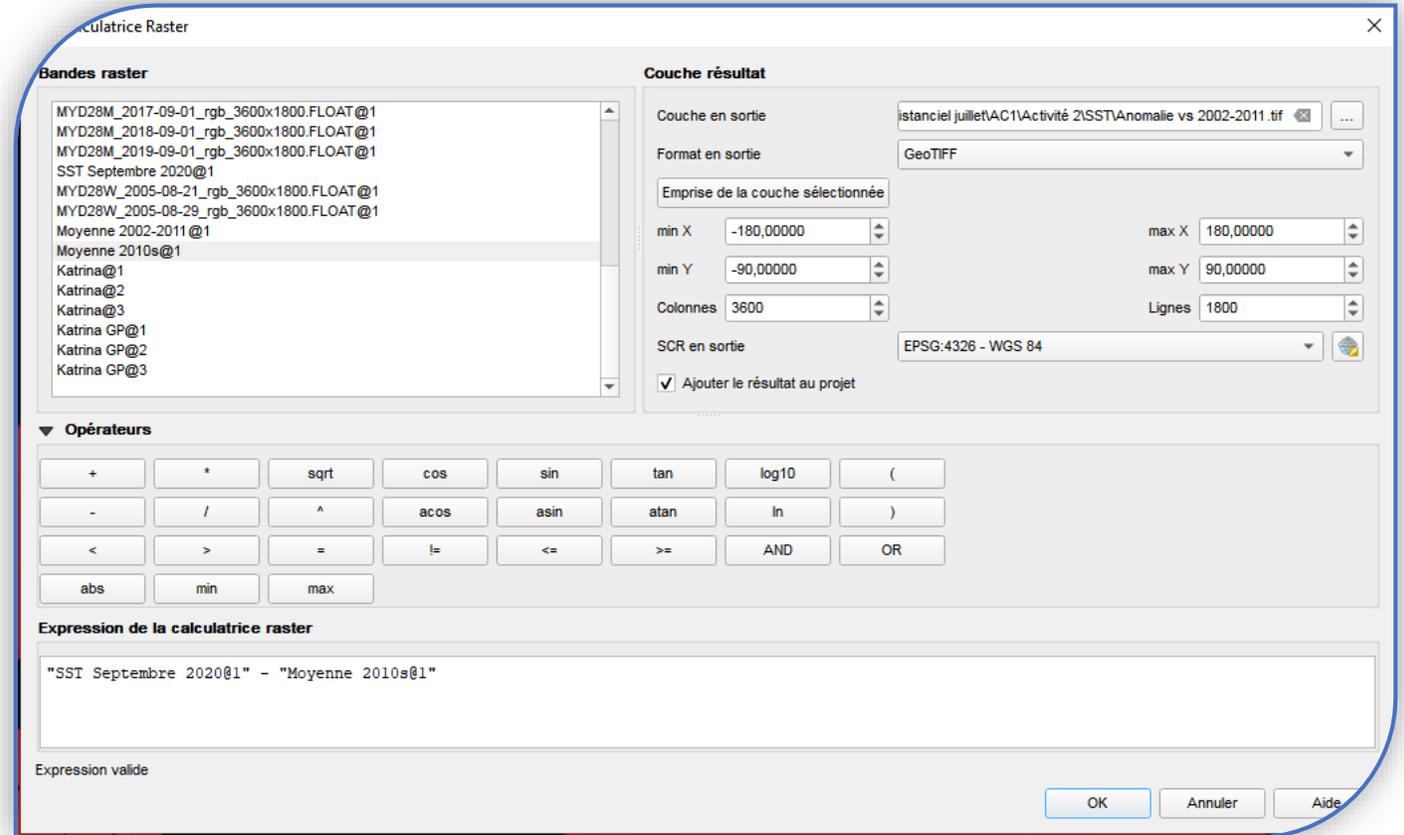
Exemple d'utilisation de données : Température de surface des océans

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

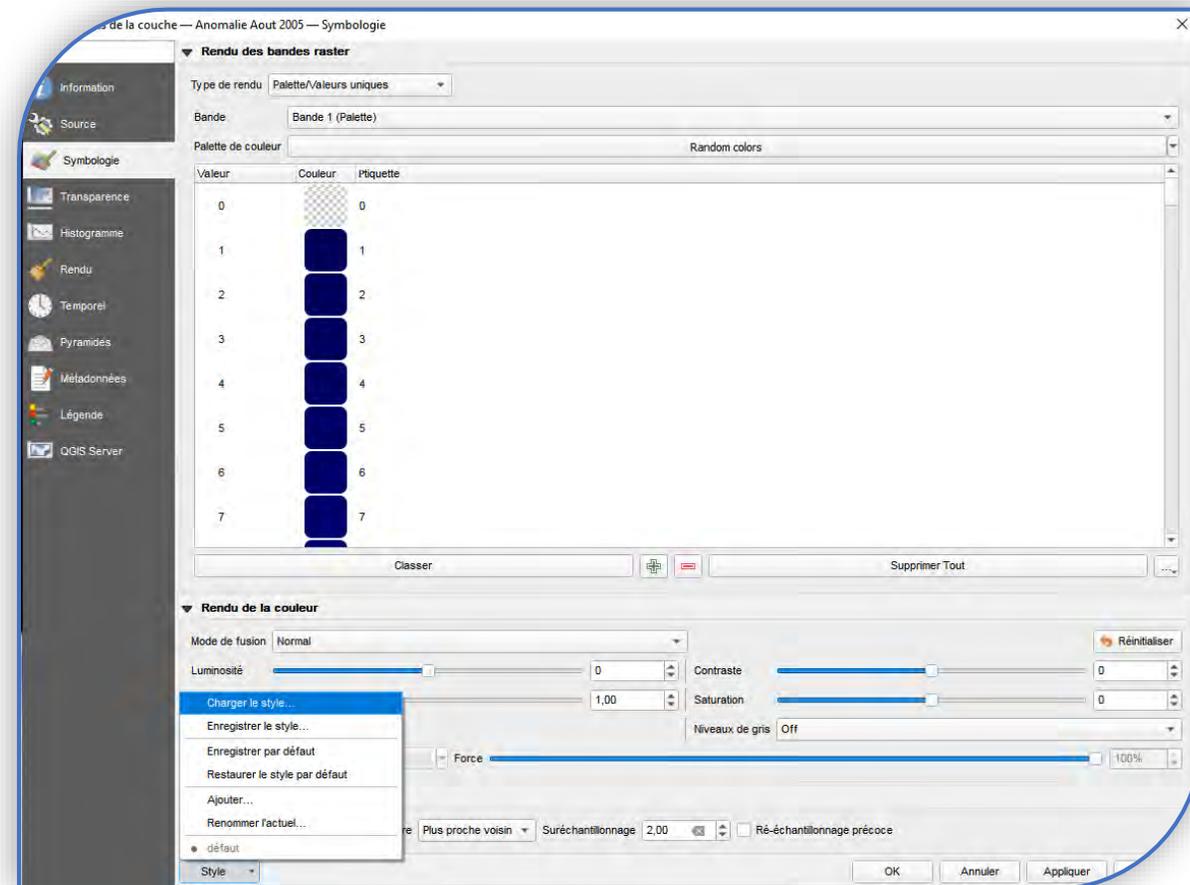


Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones

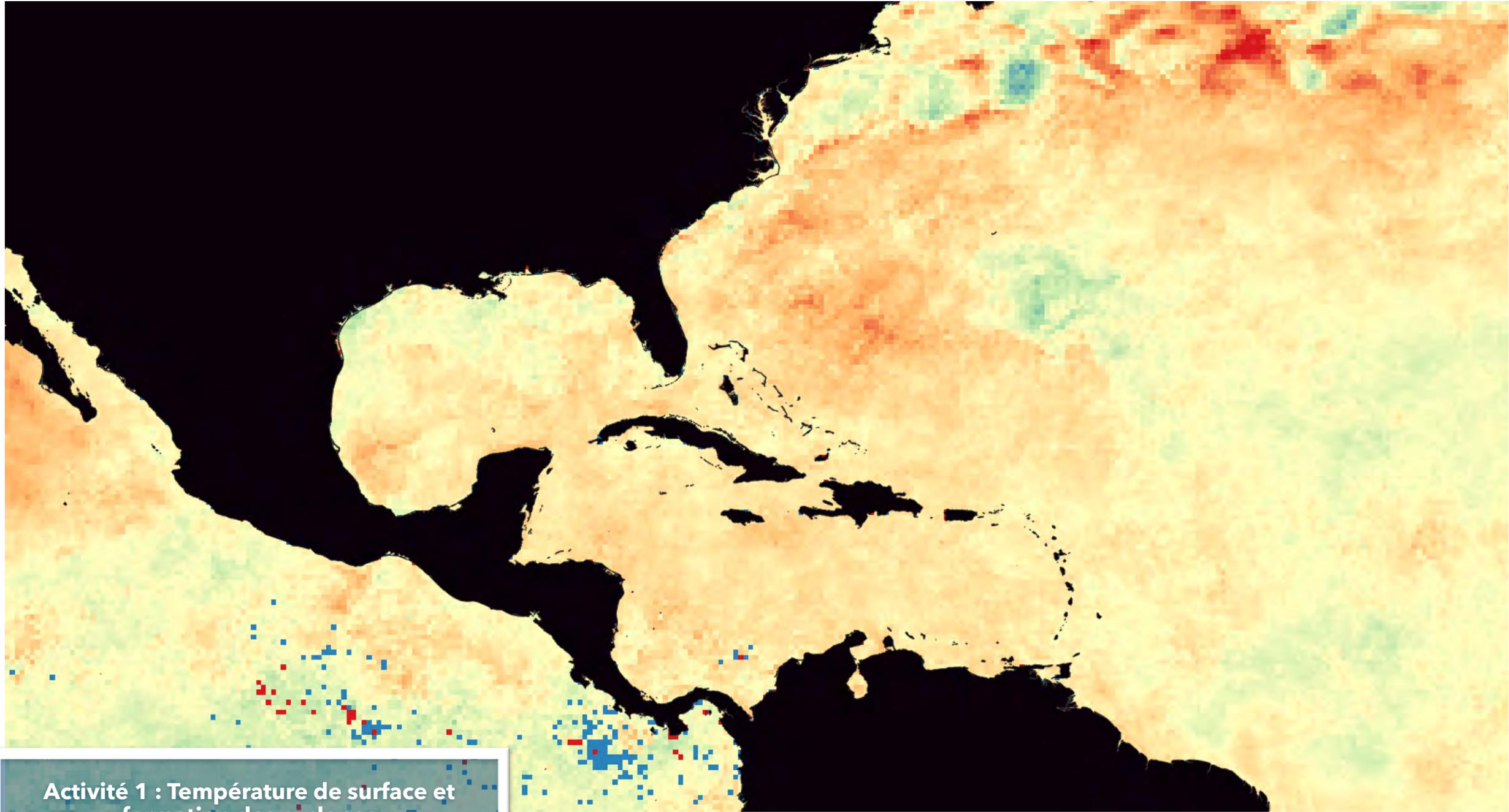


Exemple d'utilisation de données : Température de surface des océans

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



Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



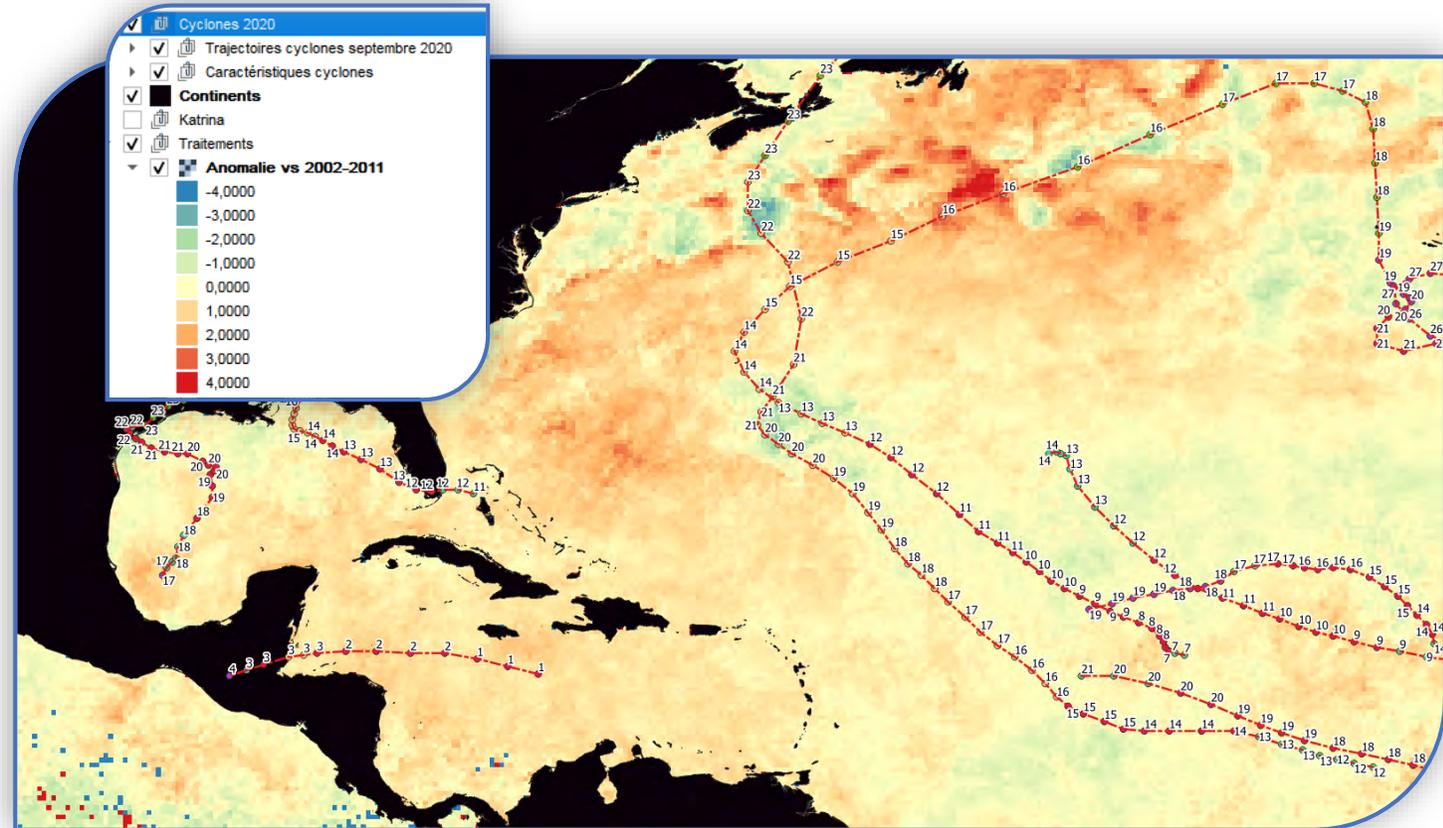
Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



Exemple d'utilisation de données : Température de surface des océans

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

Discuter des relations entre température des océans et fréquence des cyclones



Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones

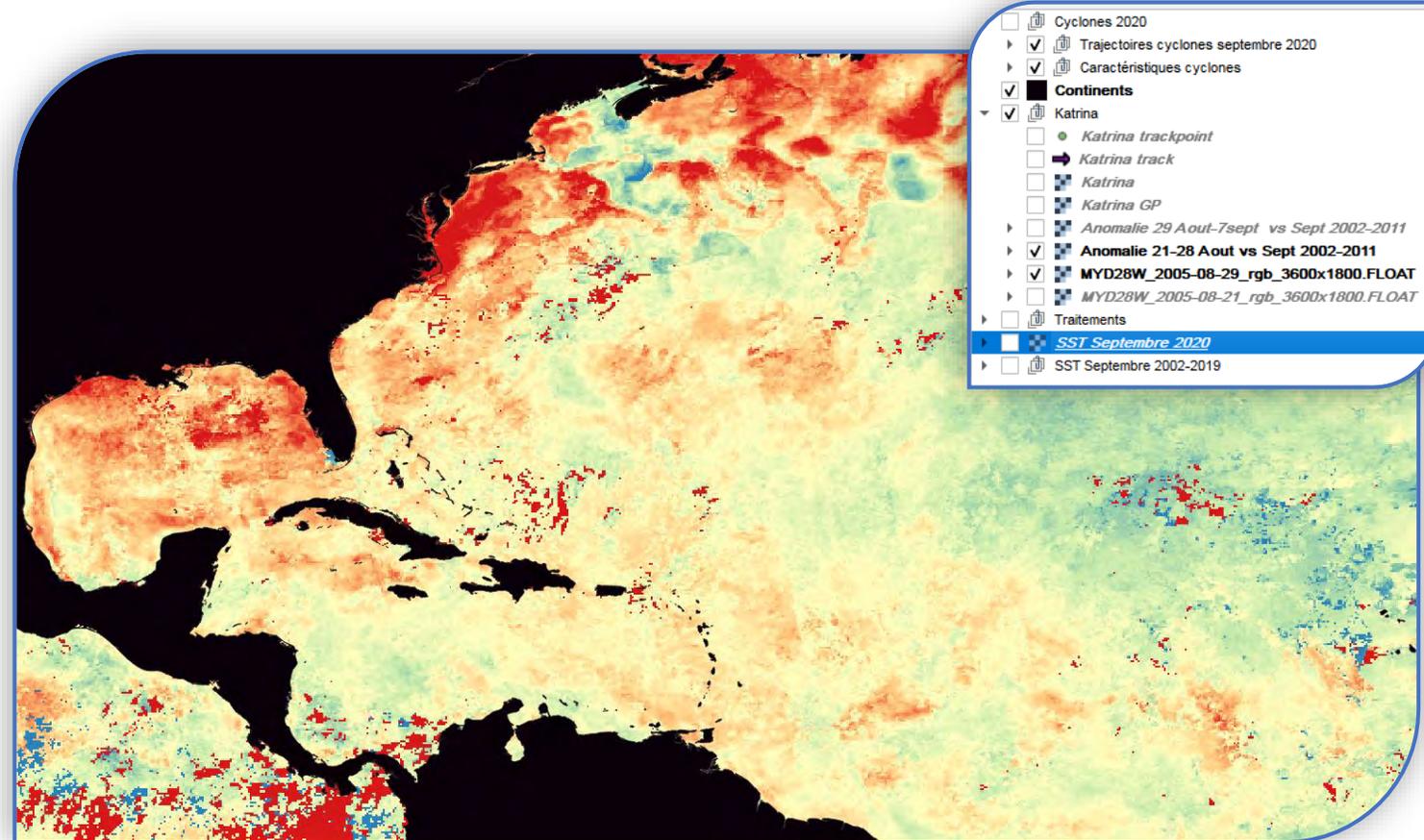


Exemple d'utilisation de données : Température de surface des océans

8. 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 août 2005 par rapport à la période 2002-2011

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



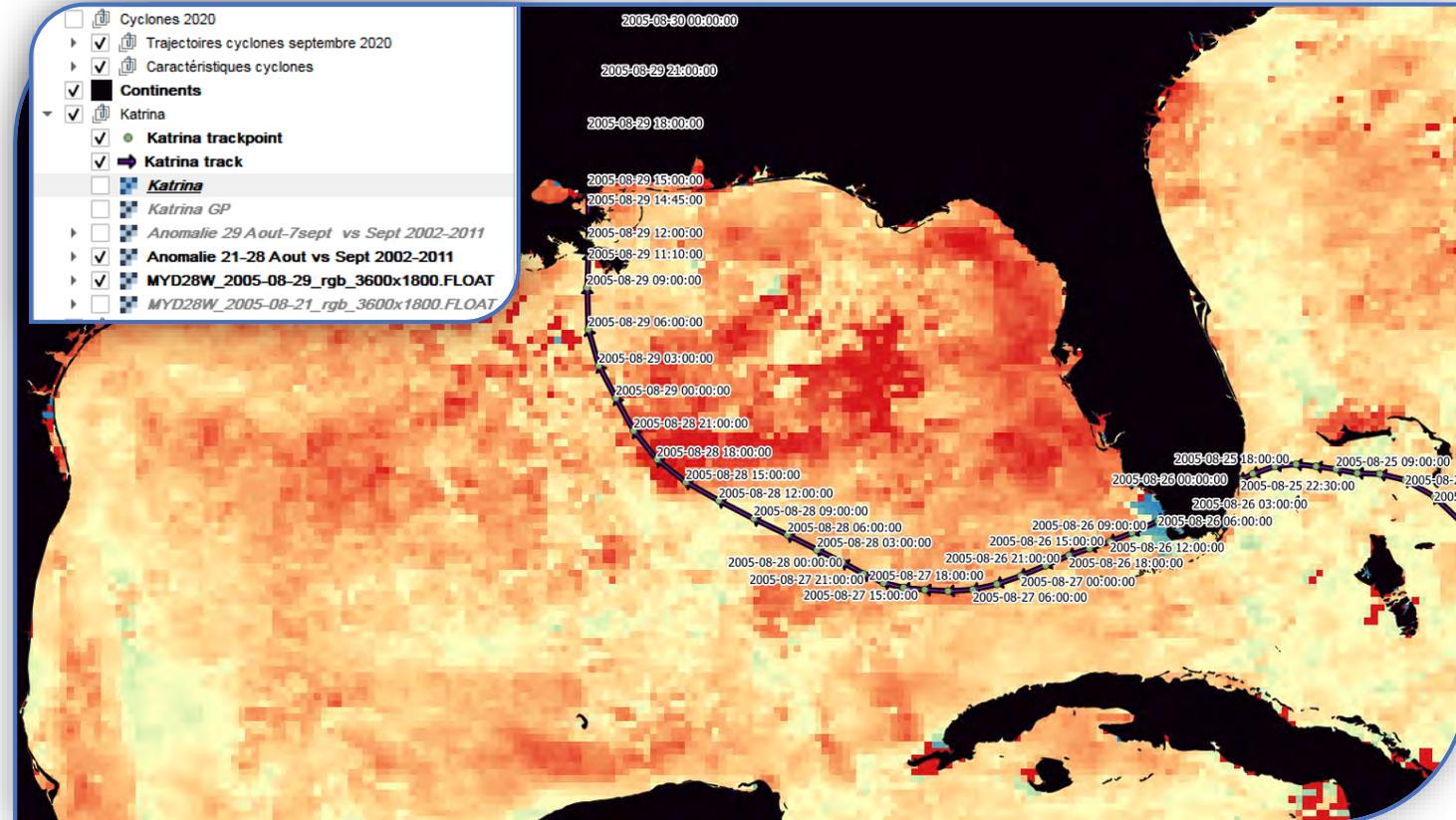
Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



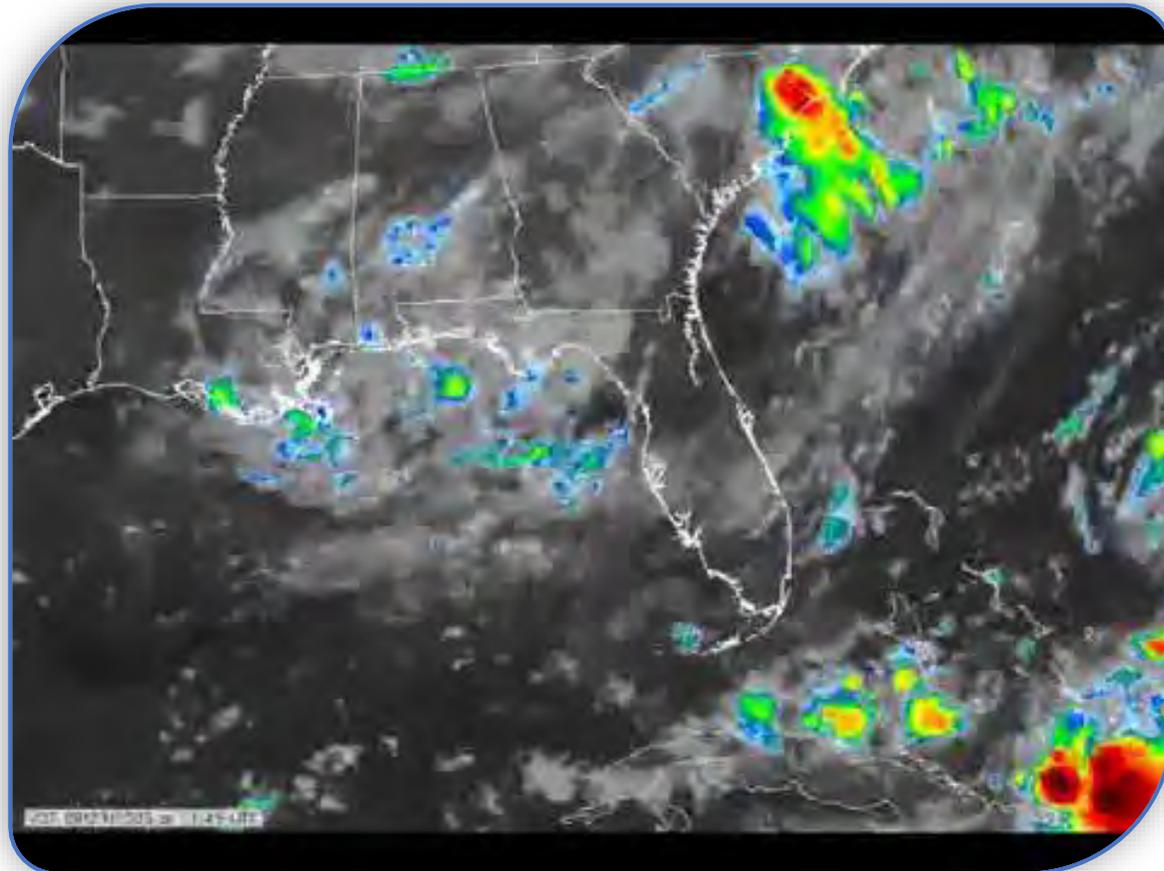
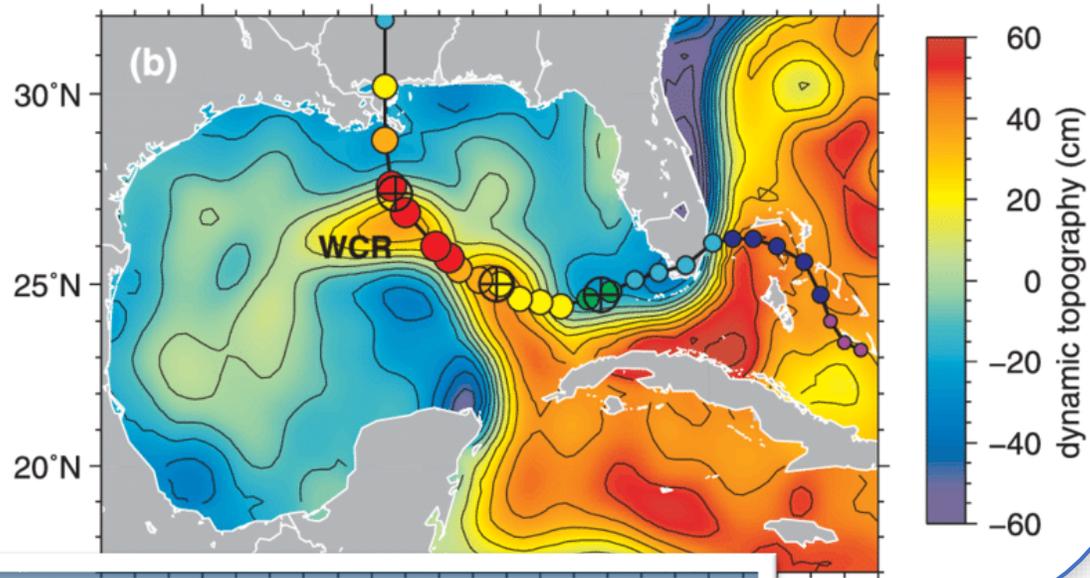
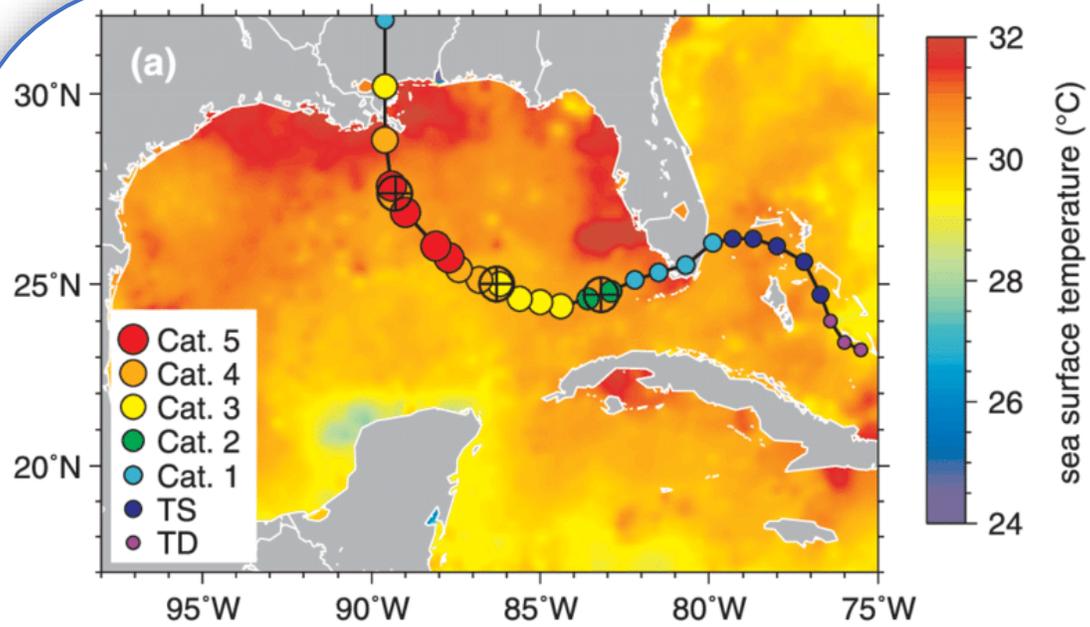
Exemple d'utilisation de données : Température de surface des océans

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

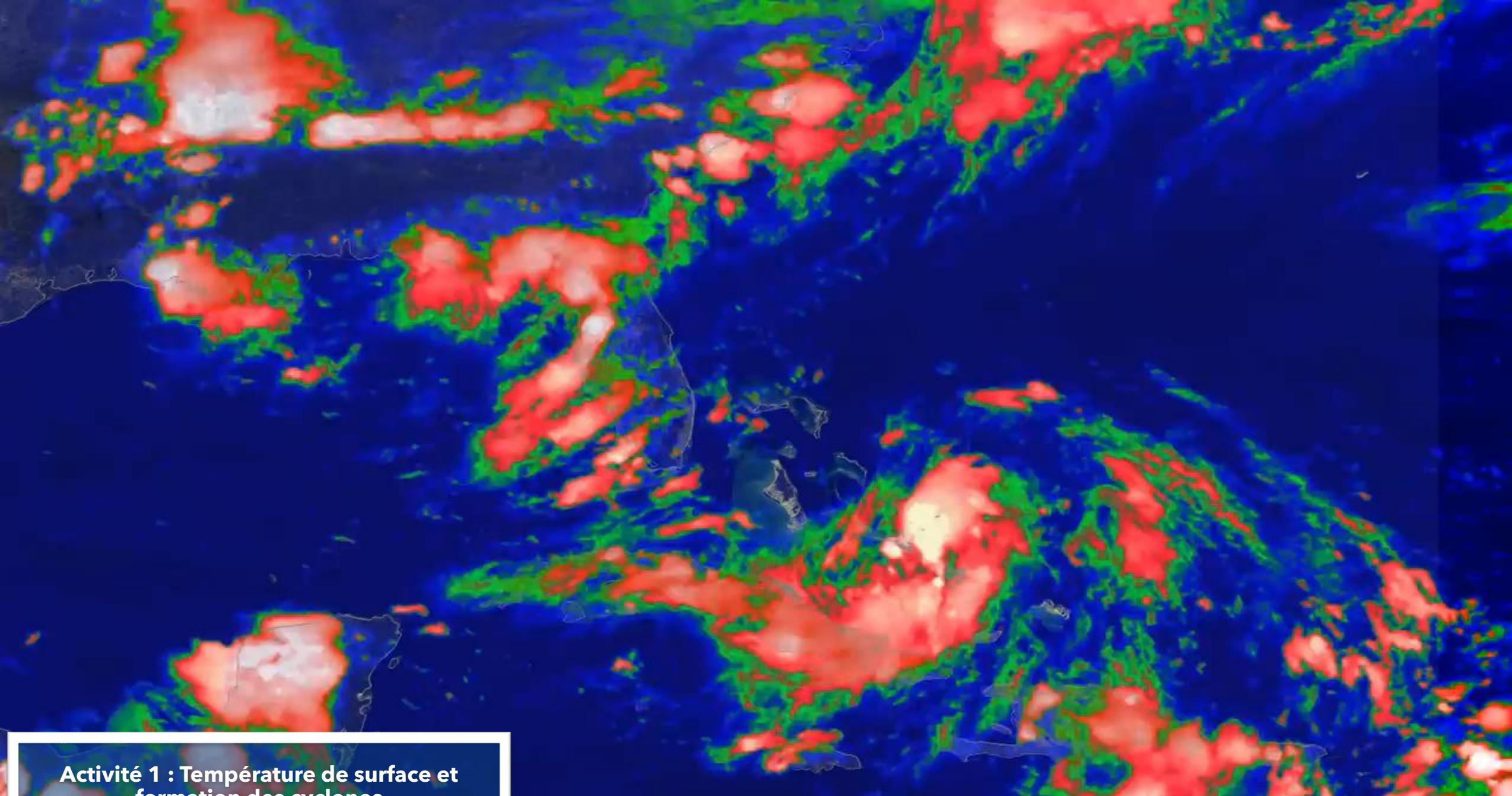
Discuter des relations entre température des océans et fréquence des cyclones



Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



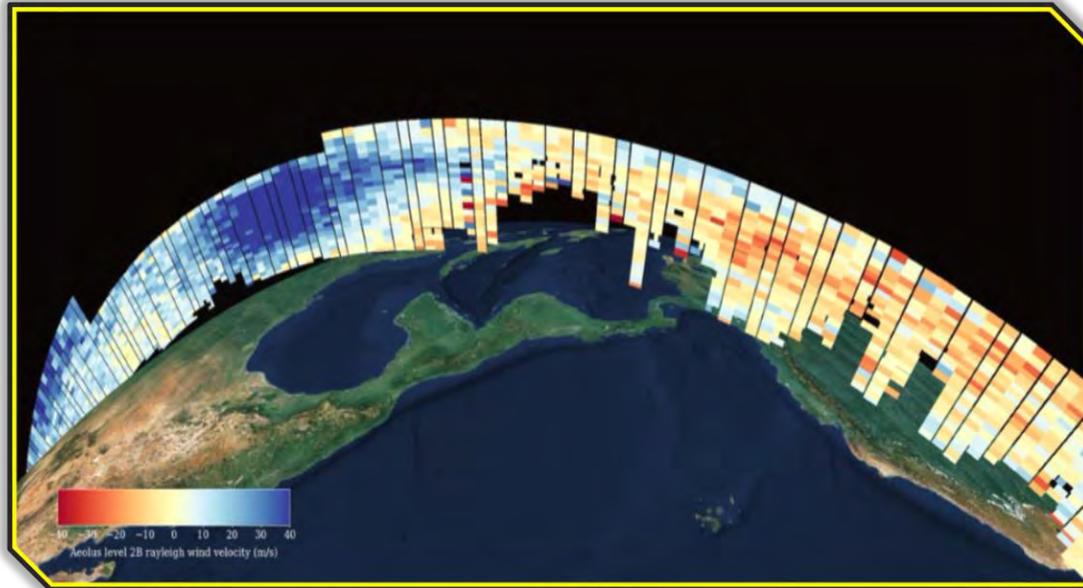
Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



Activité 1 : Température de surface et formation des cyclones



Evaluer la vitesse des vents



Des pistes pédagogiques...

Très peu de données facilement utilisables sur la vitesse des vents

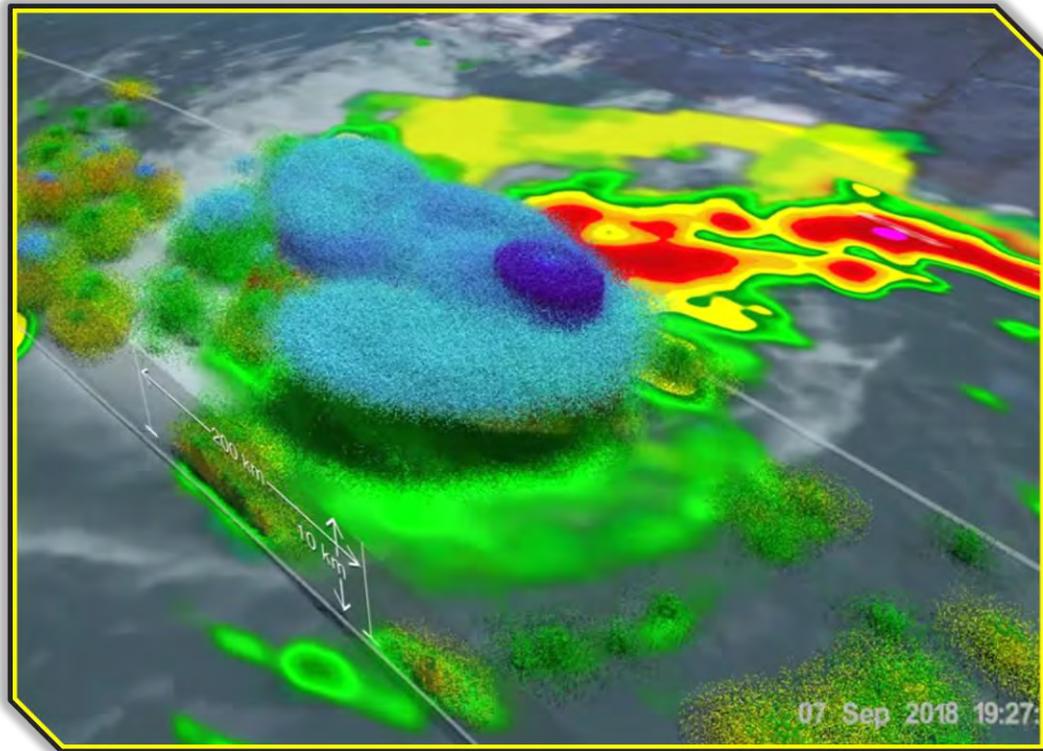
Même en utilisation documentaire, nécessité d'adapter pour faciliter la compréhension

Données de vitesses difficile à exploiter statistiquement

Profils verticaux intéressants mais difficile à lire et peu nombreux



Quantifier les précipitations associées



Des pistes pédagogiques...

Très peu de données facilement utilisables sur les précipitations

Données sur la structuration très complexes à interpréter surtout les vues de profil

Possibilité d'exploitation documentaire réalisable dans trop d'explications préalables



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Avez-vous des questions ?