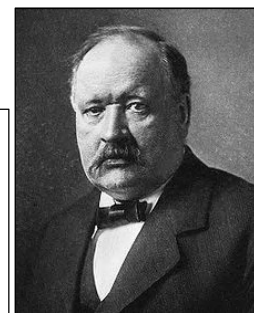


Le temps des pionniers

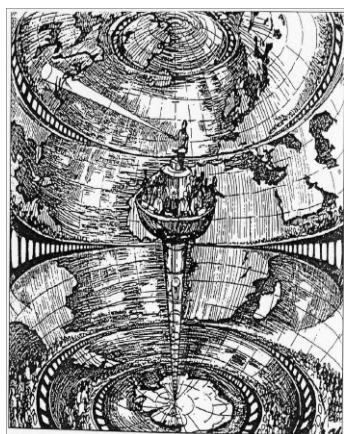


Joseph Fourier, 1824: *Les gaz de l'atmosphère terrestre augmentent la température à sa surface*

Svante Arrhenius, 1896: *Le doublement de la quantité de CO₂ conduit à un réchauffement de 4° à 5°C*



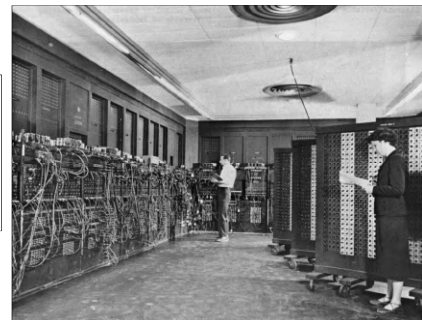
Urbain Le Verrier : Crée le réseau météorologique après la tempête qui a détruit une partie de la flotte impériale de Crimée en **1854**



Lewis F. Richardson, 1922: Imagine le calcul numérique (des hommes à la place d'ordinateurs) pour prévoir le temps. L'expérience d'une prévision à 6 heures d'échéance n'est pas concluante !



Jule G. Charney, 1950: Réalise la 1^{ère} prévision numérique du temps sur le tout nouvel ordinateur ENIAC de Princeton (USA)

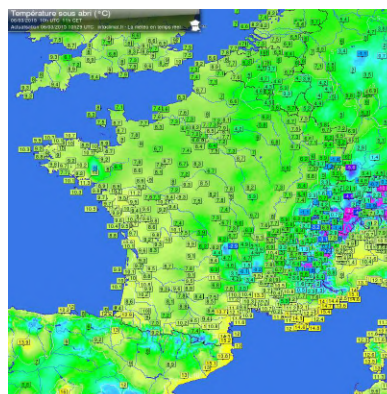
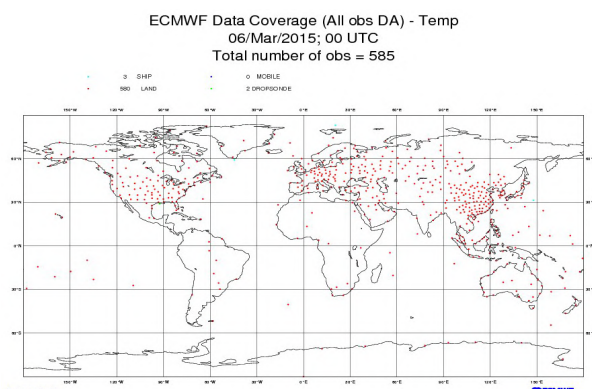
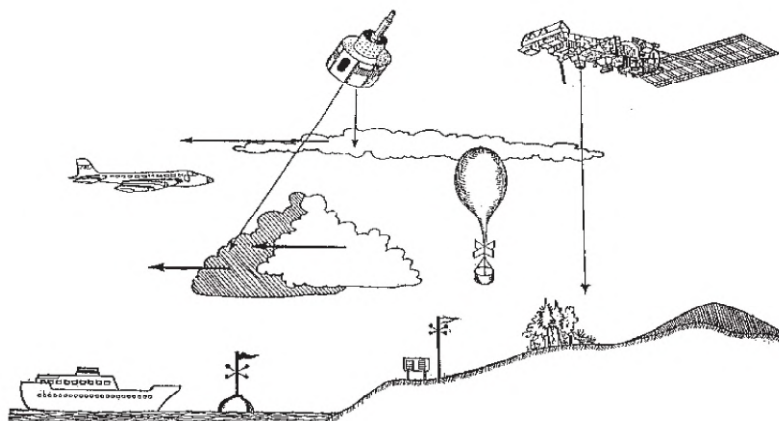


Le réseau d'observation *in situ*

Le réseau d'observation terrestre comprend

- des stations déployées à la surface du globe, sur terre et sur mer (bateaux, bouées),
- des stations de radiosondage donnant accès la structure verticale de l'atmosphère par des ballons-sondes,
- des avions équipés d'instruments de mesures,
- diverses stations mesurant l'atmosphère par télédétection (radar, lidar).

Ce réseau terrestre est complété par de nombreux instruments satellitaires



Observations de radiosondage disponibles en temps réel sur tout le globe, généralement 2 fois par jour

Stations d'observation météorologique de surface au voisinage de la France métropolitaine ; l'indication chiffrée est celle de la température de l'air sous abri

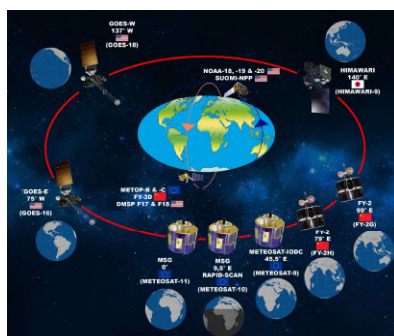
Les satellites pour la météorologie et le climat

Les satellites apportent une vision globale, homogène et continue de la planète Terre. Ils sont utilisés au quotidien pour la prévision du temps. Ils sont utilisés pour le suivi à long terme des principales variables climatiques ou, dans le cadre de missions scientifiques spécifiques, pour étudier certains mécanismes du climat. Des séries de durée d'au moins 30 ans sont nécessaires pour détecter une évolution du climat. Les premiers **satellites météorologiques** datent des années 1960. Ce sont des séries de satellites identiques, permettant des observations homogènes sur des durées d'au moins 20 ans.

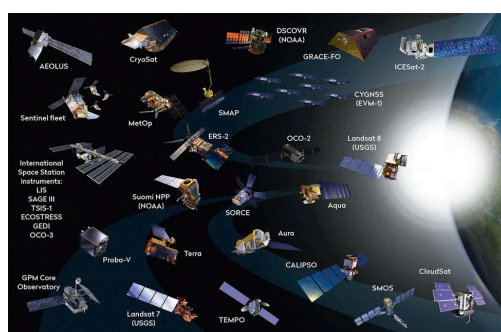
Deux types de satellites sont opérés en continu :

- Les **satellites à orbite polaire héliosynchrone** qui permettent, chacun avec leurs instruments de sondage ou d'imagerie, un vision biquotidienne du globe terrestre. Chaque point est vu aux mêmes heures solaires locales
- Les **satellites météorologiques géostationnaires** qui permettent une observation très fréquente (toutes les 7 à 30 minutes) d'une bande de latitudes de 50°S à 50°N.

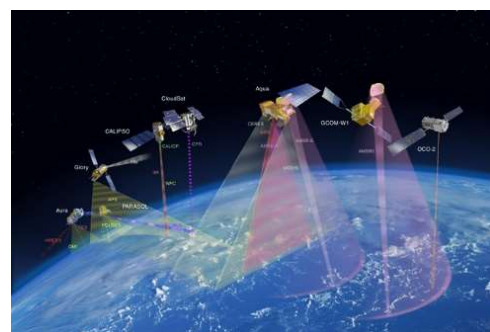
Parallèlement, de nombreux satellites scientifiques expérimentaux sont utilisés pour mesurer d'autres variables afin d'analyser, comprendre et modéliser les processus qui interviennent dans le climat. Parmi eux, les satellites d'altimétrie sont devenus un maillon indispensable du système d'observation.



Vue simplifiée du système mondial d'observation satellitaire pour la décennie 2020-30



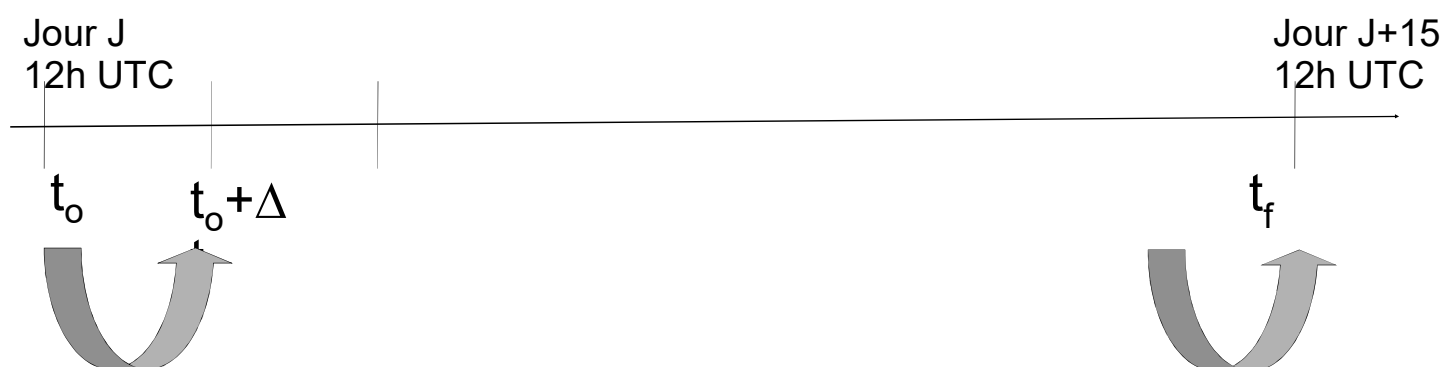
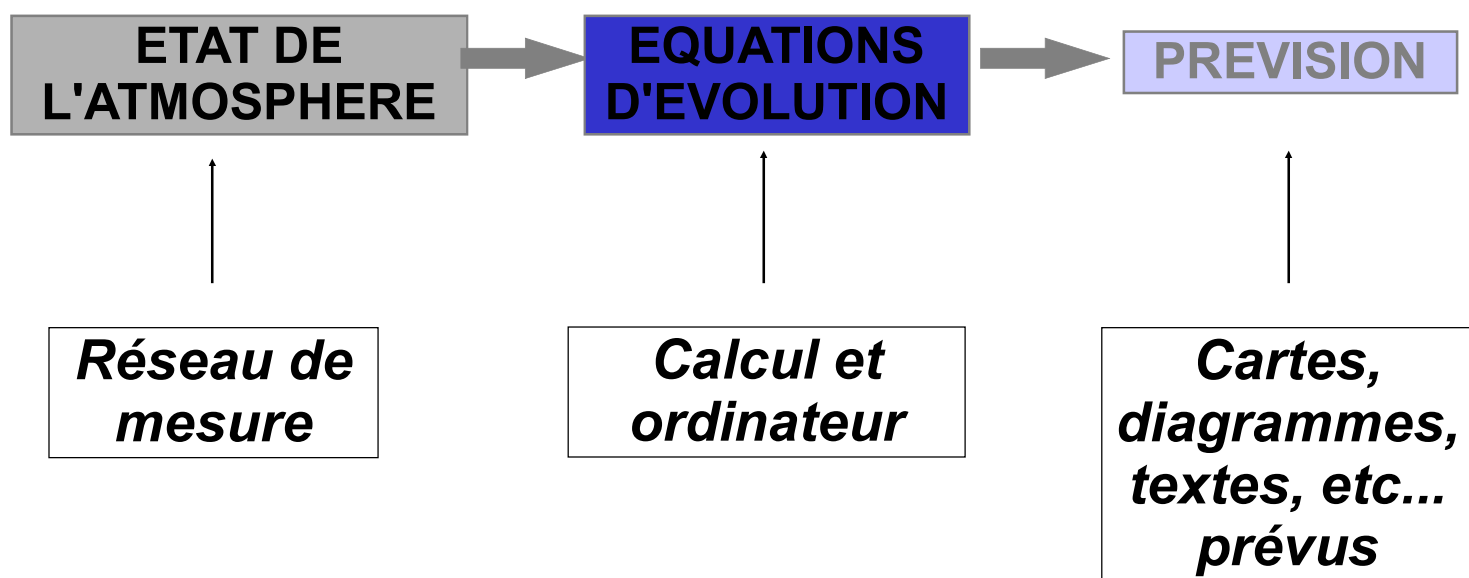
Vue partielle de la flotte de satellites scientifiques spécialisés, principalement en orbite basse



Zones d'observation au sol de quelques satellites défilants (orbite basse)

Les satellites emportent des instruments permettant d'imager et mesurer l'atmosphère et l'océan: radiomètres imageurs dans divers domaines de longueur d'onde (visible, infrarouge, hyperfréquences); sondeurs atmosphériques (interféromètres infrarouges, spectromètres); lidars; radars altimétriques, diffusiomètres; récepteurs GPS.

Comment fonctionne un modèle numérique de prévision du temps ?



Les équations d'évolution codées dans le modèle calculent l'état prévu de l'atmosphère à quelques jours d'échéance (ici 15 jours – exemple du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme), à partir de son état initial, par avances successives dans le temps : pas de temps de l'ordre de quelques minutes

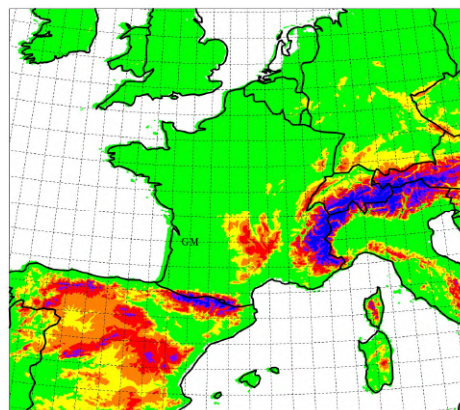
Les modèles français utilisés pour la prévision du temps

Le modèle européen appelé «IFS» (CEPMMT) fournit 2 fois par jour des prévisions jusqu'au jour 15, sur tout le globe, à une résolution horizontale de l'ordre de 8 à 10km, Les modèles globaux IFS et Arpège appartiennent à un même logiciel développé conjointement par le CEPMMT et Météo-France

Le modèle Arpège fournit 4 fois par jour des prévisions jusqu'au jour 4, sur tout le globe, à une résolution variable, atteignant environ 5 km sur la France métropolitaine, grâce à une maille de calcul étirée y permettant un effet de zoom



Le modèle Arome fournit 8 fois par jour des prévisions jusqu'au lendemain, sur un domaine encadrant la France métropolitaine, à une résolution horizontale de l'ordre de 1,3km, Une prévision AROME est aussi produite à partir de chaque heure ronde jusqu'à 3 à 6h d'échéance pour servir les besoins de la prévision immédiate



De plus, 5 modèles opérant sur des domaines limités encadrant les principaux territoires d'**outre-mer** permettent chaque jour d'affiner la prévision des modèles globaux sur ces territoires

Il existe pour tous les modèles une version dite « **d'ensemble** », ou **probabiliste**, permettant d'estimer l'incertitude associée aux analyses et prévisions météorologiques

Pour en savoir plus: <https://météofrance.fr/missions/observer-et-prevoir/des-modeles-meteo-en-constante-evolution>

La prévision immédiate

On appelle «prévision immédiate» (« nowcasting » en anglais) la prévision à quelques heures d'échéance, typiquement 3h. Il convient de l'affiner particulièrement dans le cas de phénomènes dangereux dont il faut assurer un suivi détaillé. Les prévisionnistes utilisent une palette d'outils combinant les modèles numériques et des produits élaborés à partir des images radar et satellitaires

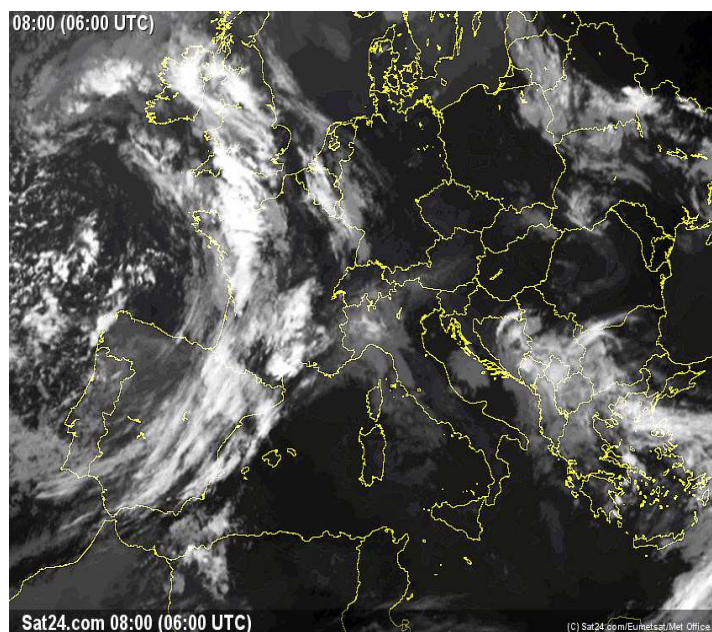


Image radar (réseau Météo-France) et image infrarouge du satellite Météosat, documentant une situation pluvieuse sur l'Ouest du territoire métropolitain (20 mai 2014, matin)

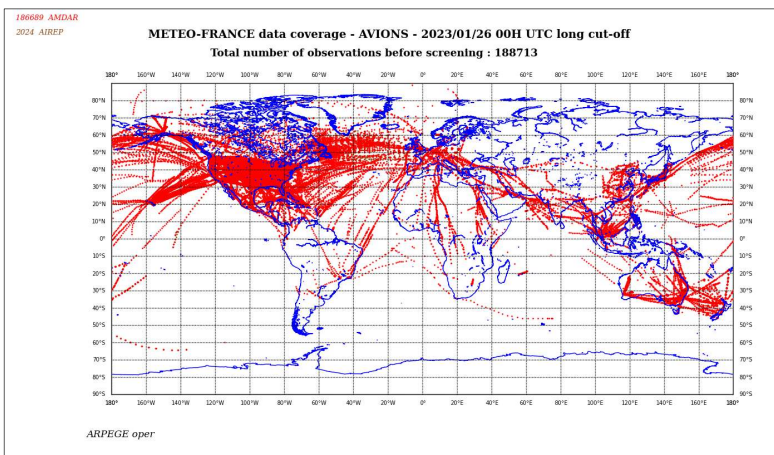
Aviation et météorologie

L'aviation utilise les prévisions météorologiques pour

- la planification des vols, en particulier pour l'optimisation des itinéraires et de la consommation, en fonction du vent et de la température;
- l'identification des phénomènes dangereux tels les cumulo-nimbus et le givrage, la turbulence en ciel clair, les panaches de cendres volcaniques, etc ...



Exemple de carte du "temps significatif" dans les basses couches de l'atmosphère, utile à l'aviation légère



Exemple de couverture des données issues d'observations par l'aviation (189.000 observations dans le cas présenté ici, au 26/01/2023 à 00 UTC)

Ces informations, disponibles sur tout l'itinéraire, sont mises à jour très fréquemment près des aéroports. Elles sont de plus en plus accessibles en temps réel en cabine de pilotage,

Les avions eux-mêmes collectent des informations pour leur propre sécurité (radar de bord pour détecter orages violents et grêle). Nombre d'avions commerciaux sont aussi équipés pour fournir en temps réel des observations *in situ* (vent, température, humidité)

La météorologie marine



Les prévisions pour la navigation concernent les vagues, le vent, la visibilité, et tous les phénomènes dangereux pour les usagers de la mer.

Elles s'appuient sur des outils spécifiques tels les modèles de vagues (couplés aux modèles atmosphériques), mis en œuvre par des équipes de prévisionnistes spécialisés.

Elles prennent la forme de bulletins nationaux pour les eaux proches des territoires métropolitain et ultramarin, et de bulletins internationaux pour des zones plus lointaines, prédéfinies par des accords internationaux

Zones couvertes par les bulletins de Météo-France
(www.meteofrance.com/previsions-meteo-marine)

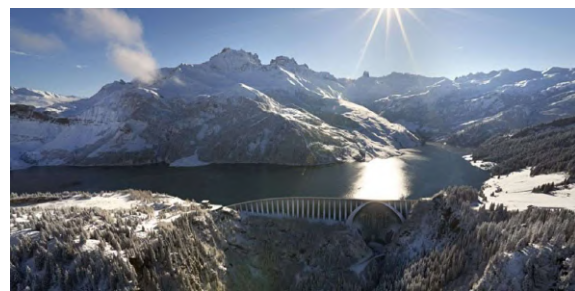
La météorologie marine participe à l'élaboration de la carte vigilance pour le risque "vagues - submersion "



La prévision météorologique est appliquée à

- la production et la distribution de l'énergie :

Prévision des consommations électriques, gestion de la production hydroélectrique et éolienne et des réseaux de distribution, maintenance et sécurité des infrastructures soumises aux aléas météorologiques ...



- l'agriculture :

Planification des récoltes, optimisation de l'arrosage et du traitement des cultures, gestion des ressources en eau ...



- la gestion des transports terrestres :


Surveillance des phénomènes dangereux (neige, verglas, brouillard, tempêtes), gestion des équipes d'intervention et de leurs moyens lourds ...



La vigilance météorologique









L'objectif est d'informer, en métropole, population et pouvoirs publics de phénomènes météorologiques dangereux. La vigilance permet d'alerter et de mobiliser les services de la sécurité civile et les autorités sanitaires


Une carte de France est actualisée au moins 2 fois par jour (à 6h et 16h), qui signale au moyen d'un code couleur, sur tout ou partie de chaque département, les menaces du jour et du lendemain



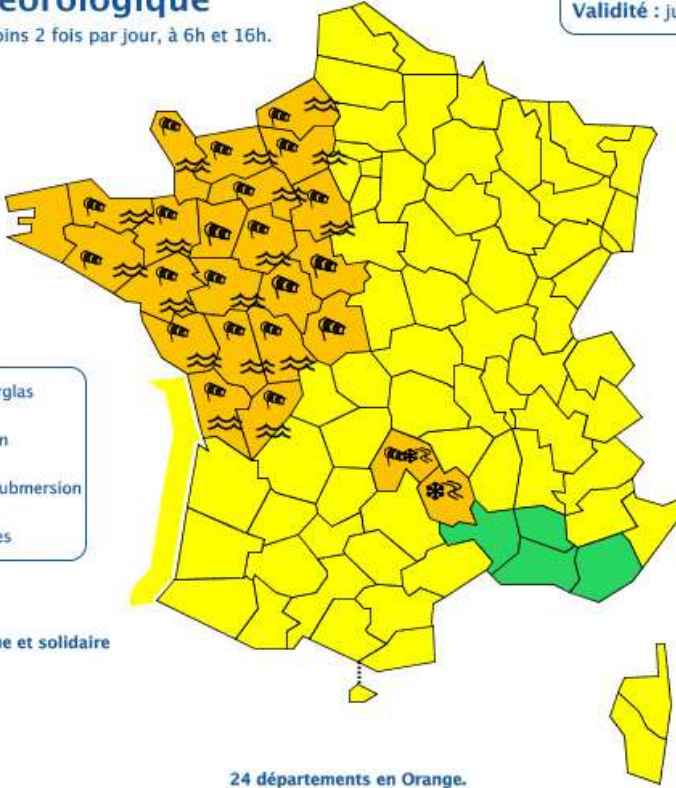
Vigilance météorologique
La carte est actualisée au moins 2 fois par jour, à 6h et 16h.

- **Une vigilance absolue s'impose** des phénomènes dangereux d'intensité exceptionnelle sont prévus...
- **Soyez très vigilant**, des phénomènes dangereux sont prévus ...
- **Soyez attentif** si vous pratiquez des activités sensibles au risque météorologique ...
- **Pas de vigilance particulière.**

 Vent violent	 Neige-verglas
 Pluie-Inondation	 Inondation
 Orages	 Vagues-submersion
 Grand Froid	 Avalanches

 Les vigilances pluie-inondation et inondation sont élaborées avec le réseau Vigicrues du Ministère de la transition écologique et solidaire

Diffusion : le dimanche 15 janvier 2023 à 16h00
Validité : jusqu'au lundi 16 janvier 2023 à 16h00



24 départements en Orange.

Consultez le **bulletin national**

Dans la nuit de dimanche à lundi et lundi matin, violent coup de vent lié à la dépression GERARD sur un quart nord-ouest du Pays.
Neigesur le sud du massif central à partir de 600/800 m à partir de la fin de nuit de

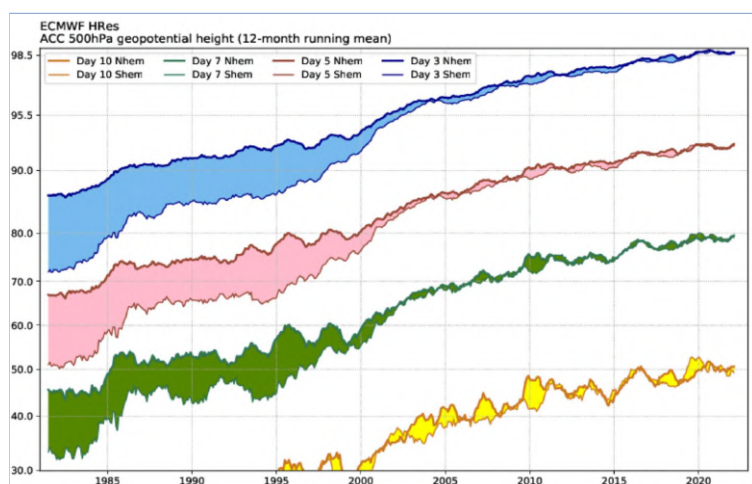
Cliquez sur la carte pour lire les **bulletins régionaux**

Copyright Météo France

Carte de vigilance émise par Météo-France le 15 janvier 2023 à 16h00 à l'occasion de la tempête "Gérard". A gauche, explications des codes couleur et des différents pictogrammes relatifs aux phénomènes dangereux.

Les progrès récents de la prévision du temps

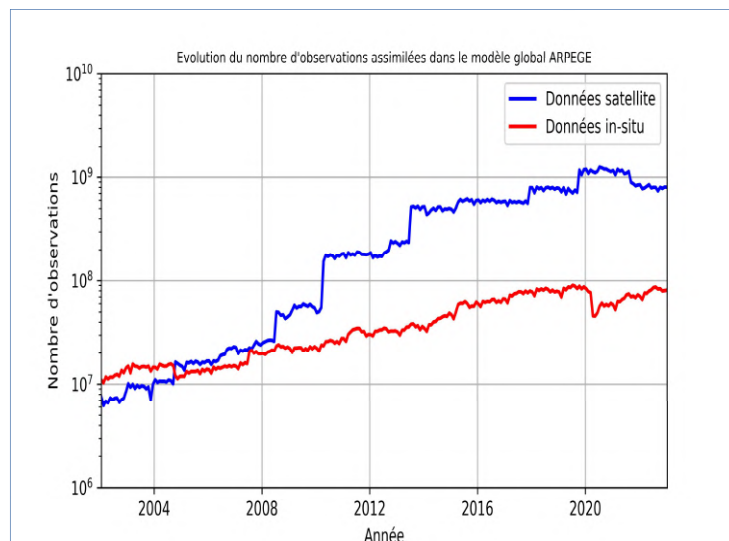
Les modèles de prévision du temps sont évalués par des scores statistiques dont on suit l'évolution progressive. Les modèles globaux sont souvent évalués par la corrélation entre anomalies prévues et observées. Pour une variable météorologique donnée, l'anomalie est son écart à la climatologie.



Progrès du modèle du CEPMMT estimés par la corrélation d'anomalie du géopotential à 500hPa aux échéances 3, 5, 7 et 10 jours. Forte progression autour de 2000, surtout pour l'hémisphère sud qui rattrape l'hémisphère nord, grâce à une meilleure utilisation de données satellitaires dont la quantité a crû fortement par la suite.

Ces courbes montrent que sur les 20 dernières années la qualité de ces prévisions a gagné environ 1 jour tous les 10 ans: la qualité des prévisions à 7 jours en 2020 est à peu près la même que celle des prévisions à 5 jours en 2000

Evolution du nombre d'observations assimilées dans le modèle global ARPEGE de Météo-France depuis 2002. En bleu: observations satellitaires; en rouge: données *in-situ* (chute du nombre en 2020 du fait de la pandémie)

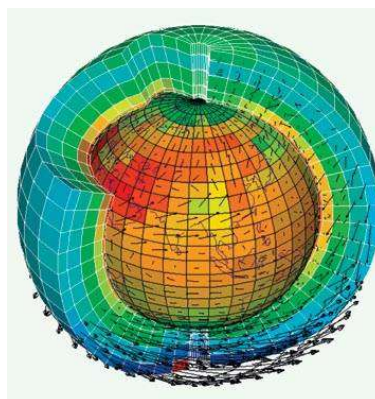


D'autres scores probabilistes sont utilisés pour suivre l'évolution des modèles et des prévisions d'ensemble. Certains ciblent la probabilité de dépassement de certains seuils pour des variables caractéristiques telles que la pluie ou le vent.

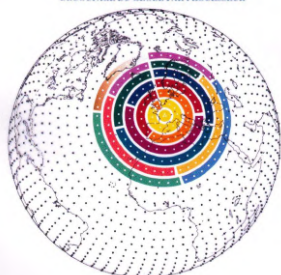
Les progrès du modèle AROME de Météo-France sont mesurés par l'indicateur IP16 qui intègre plusieurs scores de ce type. De 2010 à 2020 cet indicateur est passé de 70 à 80 (sur une échelle de 0 à 100)

Les modèles numériques pour la météorologie et le climat

Le principe est de décomposer les propriétés du système dans des petites boîtes, chacune d'entre elles représentant ce qui se passe en moyenne dans la « maille » ainsi définie.

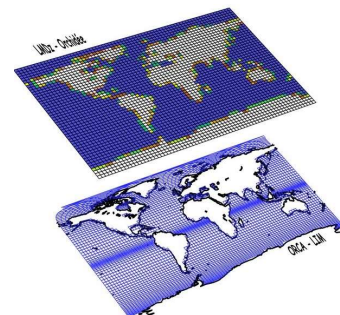


DECOUPAGE DU GLOBE PAR PROCESSION



Dans les modèles météorologiques qui servent à la prévision du temps, seules l'atmosphère et la surface terrestre sont représentées.

Dans les modèles de climat, il faut représenter à la fois l'atmosphère et l'océan, ainsi que le maximum possible des autres parties du système climatique



Afin de **prévoir les évolutions ultérieures**, les valeurs initiales des propriétés dans chaque boîte sont prescrites à partir de données observées (réseaux, satellites, bateaux, ...),

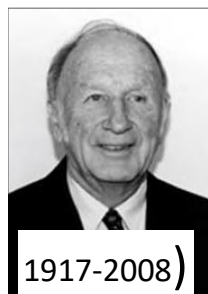
puis les lois fondamentales de l'atmosphère (et de l'océan) sont utilisées pour faire évoluer ces propriétés dans le temps. Cette phase requiert l'utilisation des super-ordinateurs les plus puissants.



Effet papillon et météorologie

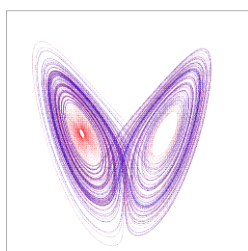
Jusqu'à quelle échéance est-il possible de prévoir le temps ? On constate que l'"écart" entre deux situations météorologiques, aussi analogues que possible à un instant donné, double tous les 2 jours et demi environ. Au bout de 15 jours ces deux situations initialement analogues sont devenues aussi différentes l'une de l'autre que 2 situations choisies au hasard.

Le démon de Laplace: *Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, la position respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers, et ceux du plus léger atome. Rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé seraient présents à ses yeux.*

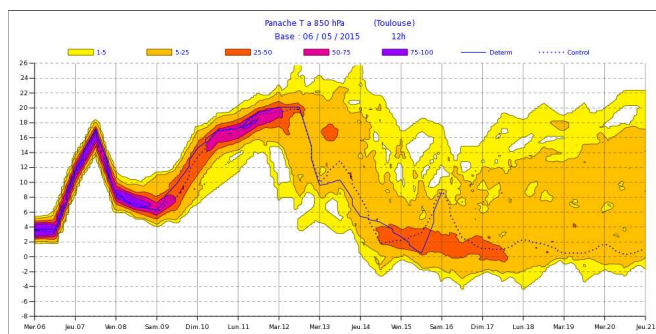


Le papillon de Lorenz: *Deux états ne différant que de manière imperceptible vont évoluer vers deux états extrêmement différents ... Si, donc, il y a la moindre erreur qui affecte l'observation de l'état actuel -et de telles erreurs sont inévitables dans l'observation des systèmes réels- une prévision acceptable d'un état instantané dans un futur éloigné peut tout à fait se révéler impossible ... Considérant les inévitables approximations et le manque de couverture des observations météorologiques, la prévision précise à très longue échéance semble donc hors de portée.*

Pourquoi un papillon ?
Le battement d'aile d'un papillon au Brésil peut-il déclencher une tornade au Texas?



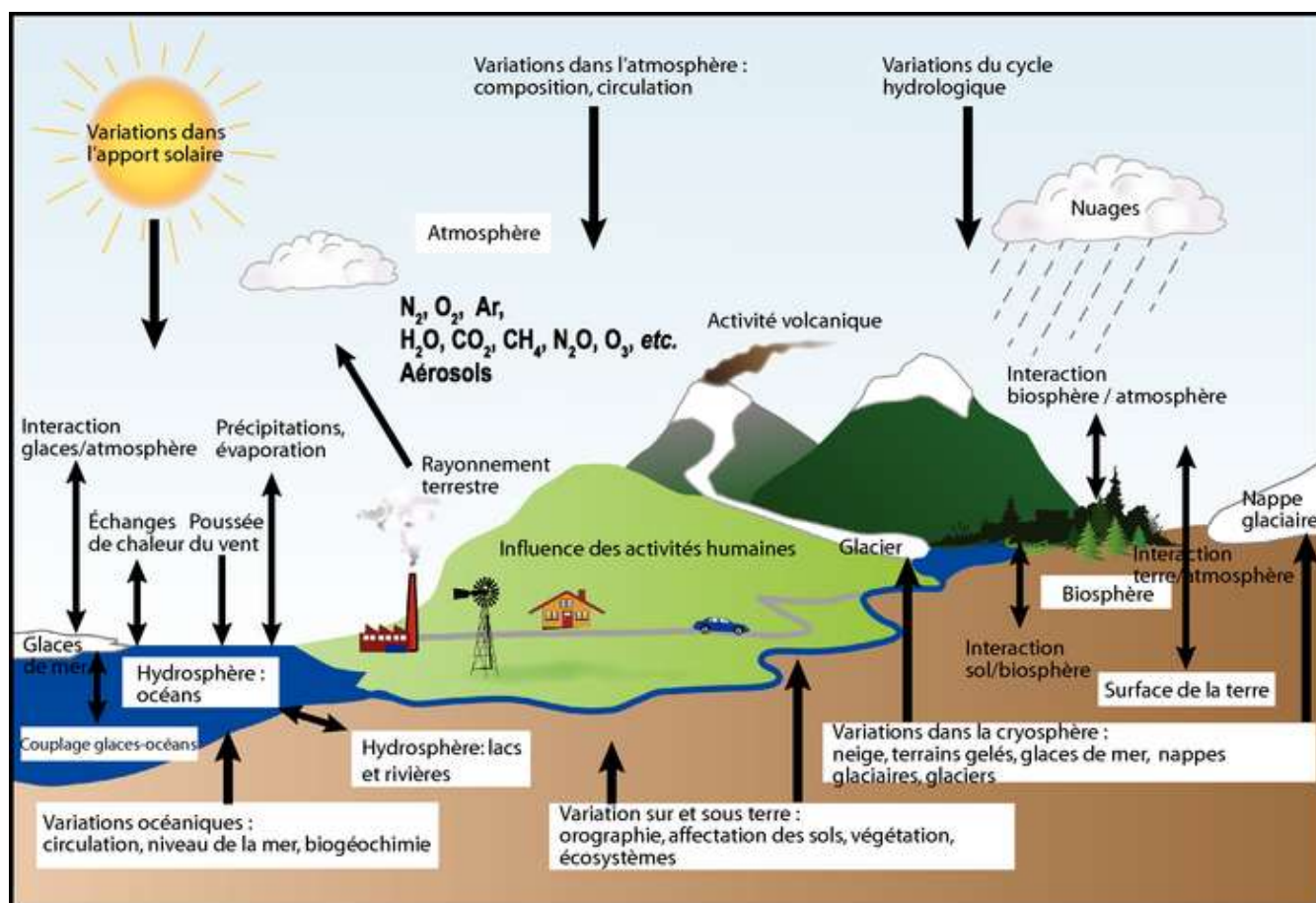
En simplifiant de manière très importante les équations qui décrivent le mouvement de l'atmosphère, Lorenz a trouvé que ce système simplifié est déjà sujet à cette forme de chaos, c'est l'**attracteur de Lorenz** et le **chaos déterministe**



La limite de prévisibilité déterministe de l'atmosphère est égale à, au plus, **2 semaines**. Au-delà une prévision précise de la situation météorologique à un moment donné est impossible. Seules certaines propriétés moyennes peuvent rester accessibles: c'est le domaine des **scénarios** et de la **prévision climatiques**. La figure ci-contre montre comment des prévisions réalisées à partir d'états initiaux extrêmement proches divergent progressivement les unes par rapport aux autres.

Le système climatique

Le climat terrestre résulte de nombreuses interactions entre l'atmosphère d'une part, et de nombreux autres milieux tels que l'océan et la glace de mer, la végétation, les glaciers et les calottes polaires d'autre part. Il est piloté par la quantité de rayonnement solaire qui atteint la surface et par la concentration des gaz à effet de serre qui contrôlent son refroidissement vers l'espace.



Certaines parties du système climatique évoluent de façon très rapide, comme l'atmosphère dont le mouvement peut changer en moins d'une heure, d'autres de façon plus lente, comme l'océan dont les évolutions prennent des mois et des années, tandis que d'autres n'évoluent que sur des durées d'au moins plusieurs siècles, comme par exemple les calottes polaires.

Forçages et rétroactions climatiques

Le système climatique terrestre n'interagit avec l'espace que par l'intermédiaire du seul rayonnement, qui détermine l'équilibre global du système. Le bilan radiatif de la Terre est la différence entre l'énergie solaire absorbée, et l'énergie réémise par la planète sous forme de rayonnement infrarouge. Sur le long terme, la Terre est en équilibre radiatif, les deux termes étant égaux et de signes opposés.

Le forçage radiatif

Un forçage radiatif se produit lorsqu'apparaît un déséquilibre entre l'énergie solaire reçue et absorbée et l'énergie infrarouge réémise. Le forçage radiatif est positif s'il y a plus d'énergie pour réchauffer le système, ou négatif dans le cas contraire (refroidissement du système).

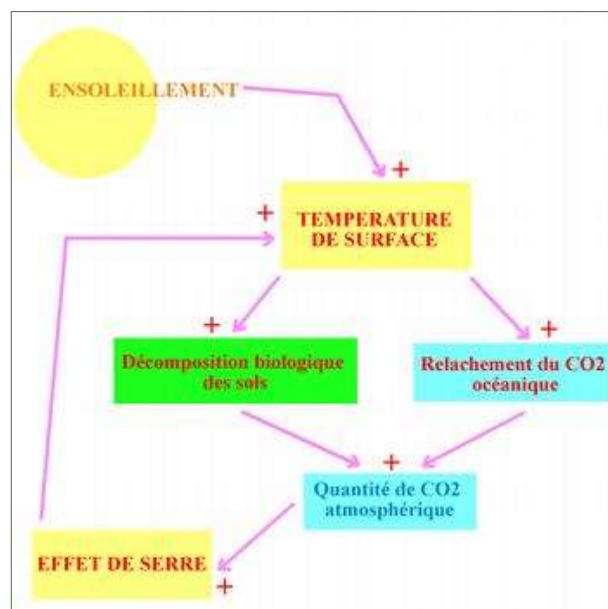
Les rétroactions, clés de la sensibilité climatique

Une rétroaction est une modification du bilan radiatif produite par le changement de l'une des composantes du système climatique, changement lui-même déclenché par le forçage initial.

Une rétroaction très importante est celle liée à l'albédo, c'est-à-dire au pouvoir réfléchissant de l'atmosphère ou de la surface, par exemple apparition ou disparition de la glace et de la neige : dans un monde plus chaud il y a moins de neige, l'albédo diminue, l'énergie solaire absorbée augmente, elle amplifie donc le forçage initial, c'est une **rétroaction positive**. Au contraire, si la température diminuait, la rétroaction albédo amplifierait le refroidissement.

Il existe de très nombreuses autres rétroactions :

- la rétroaction de la vapeur d'eau, positive car c'est un puissant gaz à effet de serre;
- la rétroaction des nuages, dont le signe et l'amplitude sont encore sujets de discussion, en fonction de l'altitude à laquelle ils seront modifiés;
- la rétroaction positive de dissolution du gaz carbonique dans l'océan: plus l'océan se réchauffe et plus il dégage son CO₂ vers l'atmosphère;
- la rétroaction négative de la végétation, -etc.



Les rétroactions des nuages

Les rétroactions nuageuses sont à la fois négatives, car les nuages constituent un écran au rayonnement solaire et leur augmentation génère donc un refroidissement, et positives car les nuages provoquent une augmentation de effet de serre. Dans le climat actuel l'effet négatif l'emporte.

Toutefois, dans le cas du réchauffement climatique présent et à venir, la rétroaction globale des nuages n'est pas encore bien connue: le réchauffement dû à l'augmentation des gaz à effet de serre modifiera-t-il la couverture nuageuse globale et sa répartition? Y aura-t-il plus de nuages bas (effet négatif) ou de nuages hauts (effet positif) ?

L'océan et le climat

L'océan est une composante essentielle du système climatique, qui doit être observée, modélisée et étudiée pour bien suivre l'évolution du climat futur. Par rapport à l'atmosphère, la masse de l'océan est 300 fois supérieure et sa capacité thermique est 1000 fois supérieure. 93% de l'excédent de chaleur lié à l'augmentation de l'effet de serre a été stockée dans l'océan (rapport GIEC 2013).

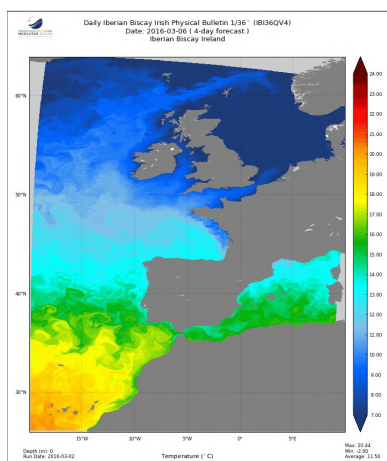
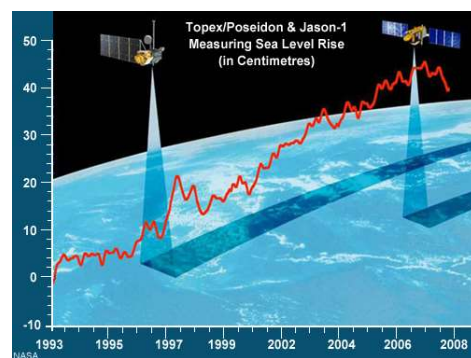
Pour modéliser l'océan, on doit en connaître la température, la salinité et le courant sur toute sa profondeur, ainsi que le niveau de sa surface (hauteur dynamique). On doit aussi prendre en compte des éléments de chimie océanique pour bien comprendre le rôle du plancton dans le cycle du carbone.

Il existe plusieurs systèmes (*in-situ* ou satellitaires) permettant d'observer la surface de l'océan : stations côtières, bateaux, bouées, radiomètres embarqués sur satellites... L'océan profond est inaccessible aux mesures spatiales et n'est observé que par des «profileurs» plongeant jusqu'à quelques kilomètres de profondeur.

Depuis les années 1990, plusieurs satellites altimétriques (Jason, Sentinel....) permettent de mesurer en continu le niveau de la mer.



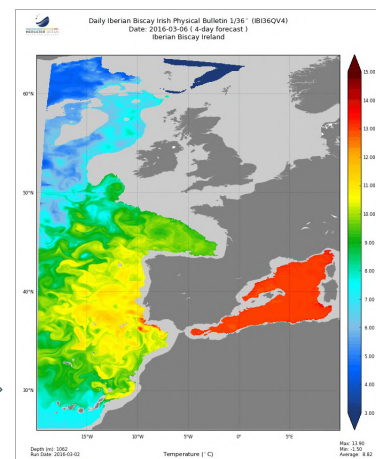
Flotteur profileur ARVOR (IFREMER)



A l'image de ce que font les centres de prévision météorologique pour l'atmosphère, Mercator-Océan produit quotidiennement des analyses et des prévisions de l'état de l'océan (<http://www.mercator-ocean.fr>).

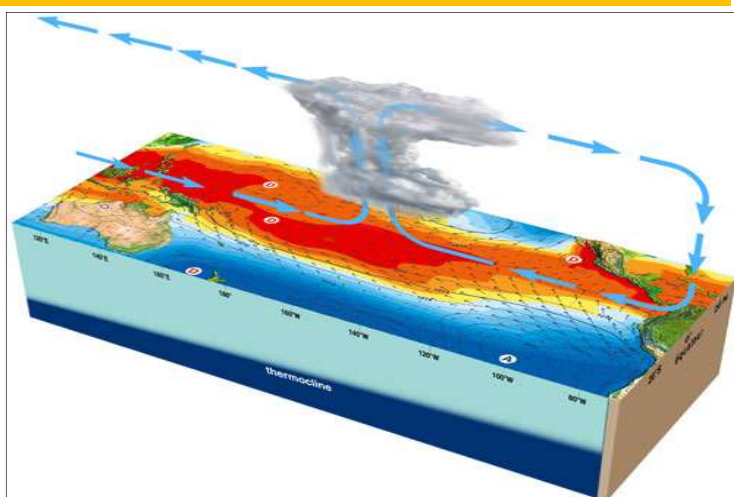
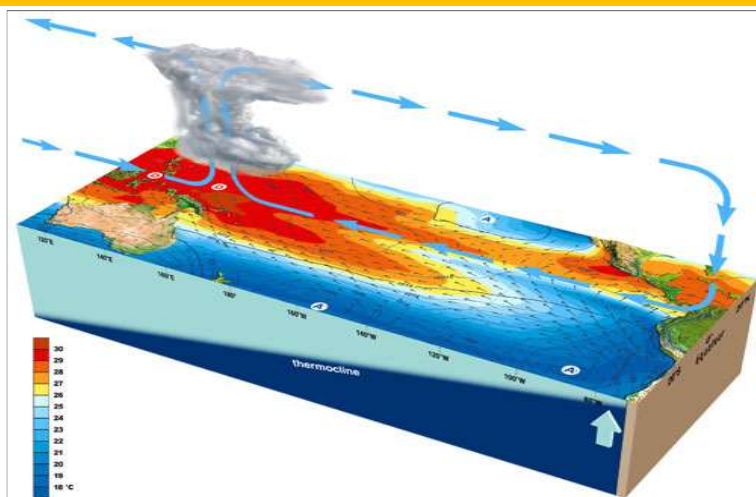
Prévision de la température de la mer à 4 jours d'échéance:

← en surface à 1000m de profondeur →

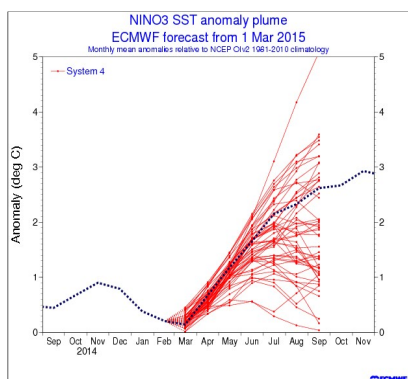


Le phénomène El Niño

El Niño, et sa contrepartie La Niña, sont des phénomènes océaniques couvrant tout l'océan Pacifique équatorial, qui affectent le régime des vents, la température de la mer, la hauteur dynamique de l'océan et les précipitations sur une grande partie du globe. Lors d'un épisode El Niño, les alizés (vents d'Est près de l'équateur) faiblissent ou tournent à l'ouest. Les eaux chaudes de surface se déplacent alors vers l'est. Des conditions sèches se développent sur l'Indonésie et sur l'Australie, des cyclones apparaissent beaucoup plus à l'est qu'à l'habitude.



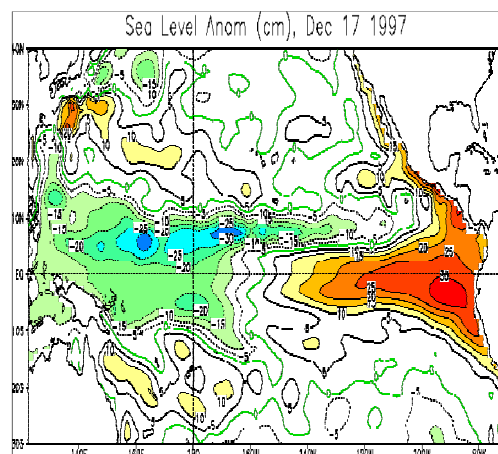
*Vent et température océanique sur le Pacifique équatorial :
situation moyenne à gauche et situation El Niño à droite.*



El Niño 2015

Prévision à 6 mois réalisée par le CEPMMT en mars 2015, où les incertitudes sont matérialisées par le panache rouge des différentes prévisions.

Les hivers 1982/83 et 1997/98 ont été des années de fort El Niño. Le phénomène El Niño de 2015/2016 a été assez bien prévu dès mars 2015 sous forme d'une anomalie de température océanique au centre du Pacifique,

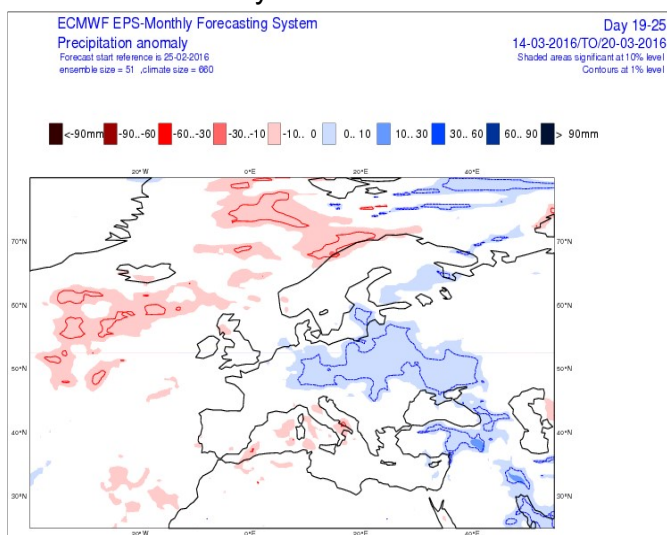


El Niño 1997

Anomalie de hauteur de l'océan

Prévision mensuelle et saisonnière

La prévision mensuelle, tout comme la prévision à moyen terme (15 jours d'échéance), utilise des modèles de prévision météorologiques couplés à des modèles océaniques. La prévision locale au jour le jour n'étant plus possible au au-delà de 15 jours (effet papillon), on se contente alors d'extraire une tendance moyennée sur une semaine.

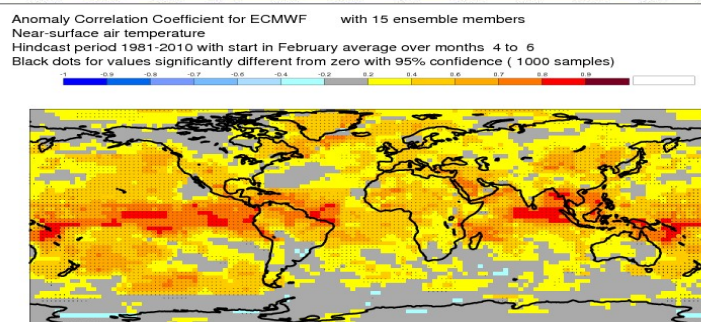
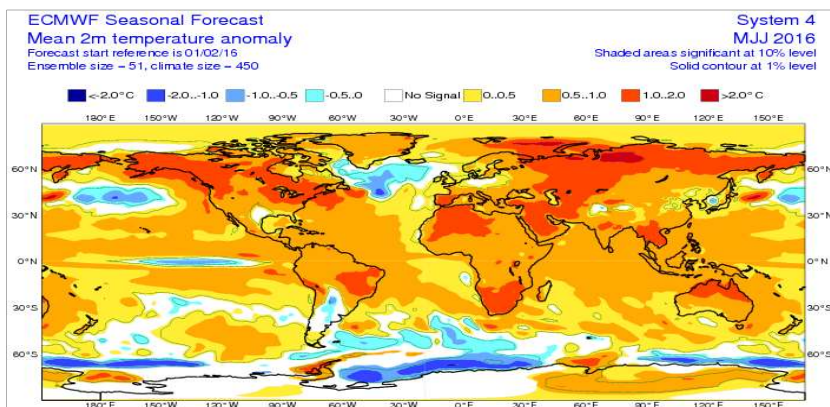


Au Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT), la prévision mensuelle est exécutée deux fois par semaine. Un ensemble de modèles produit plusieurs dizaines de prévisions numériques tenant compte des diverses sources d'incertitude.. La carte ci-dessus illustre les anomalies de précipitation prévues moyennées sur la semaine allant du jour 19 au jour 25 d'une prévision

En France, ces grandes tendances sont analysées et résumées dans la rubrique **TENDANCES** du site www.meteofrance.com

En prévision saisonnière, les conditions initiales de l'océan constituent la source principale de prévisibilité (et donc d'incertitude). Les modèles doivent prendre en compte l'évolution de l'ensemble des éléments du système climatique : atmosphère, océan, glaces, surfaces continentales....

Les prévisions saisonnières sont généralement réalisées chaque mois, produisant pour l'année à venir des «tendances moyennées sur 1 à 3 mois». La figure ci-dessous présente en haut les anomalies de la température atmosphérique près du sol, prévues en février 2016 par le CEPMMT pour la période mai-juillet 2016 (en rouge les anomalies chaudes et en bleu les anomalies froides). La carte présente en bas un score caractérisant la qualité attendue de ces prévisions saisonnières : seules les régions rouges et orangées sont caractérisées par une assez bonne prévisibilité (régions océaniques intertropicales).



Pour les prévisions saisonnières voir:

<https://meteofrance.fr/actualite/publications/les-tendances-climatiques-trois-mois>

L'effet de serre



La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, ainsi que d'autres gaz en faible concentration, sont naturellement présents dans l'atmosphère. Ils laissent pénétrer le rayonnement solaire qui vient réchauffer la surface de la Terre. Ils emprisonnent une grande partie du rayonnement infrarouge réémis par la surface et l'atmosphère, ce qui provoque un réchauffement de la basse atmosphère. Ils constituent les **gaz à effet de serre**.

Sans leur présence, la température moyenne d'équilibre de la surface terrestre serait de -18°C . Avec les seuls gaz à effet de serre « naturels » l'équilibre thermique de la surface s'établit à $+15^{\circ}\text{C}$. Au-delà, toute augmentation de la quantité des gaz à effet de serre, en particulier par suite des émissions liées à l'activité humaine, conduit à un réchauffement supplémentaire de l'atmosphère: c'est le **réchauffement climatique**.



Joseph Fourier : Développe en **1824** une théorie selon laquelle les gaz de l'atmosphère terrestre augmentent la température à sa surface: on parle à l'époque de «**chaleur obscure**»



Svante Arrhenius : Publie en **1896** qu'un doublement de la concentration de CO_2 conduit à une augmentation de température de 4 à 5°C



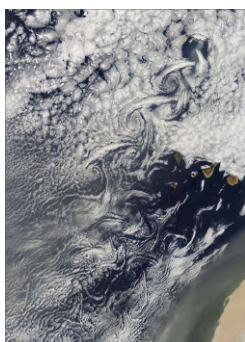
Guy S. Callendar : Constate en **1938** une augmentation de 10% du CO_2 , qui semble très excessive à ses contemporains

L'apport des satellites au suivi du changement climatique

Les données satellitaires contribuent au suivi du changement climatique de différentes façons:

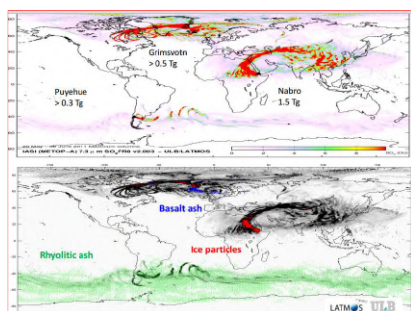
- connaissance et compréhension des distributions spatiales de la nébulosité;
- étendue et suivi temporel des feux, des panaches de sable ou de cendres volcaniques
- suivi des principales variables climatiques
- étude et modélisation des processus

Formation de vortex autour des Canaries

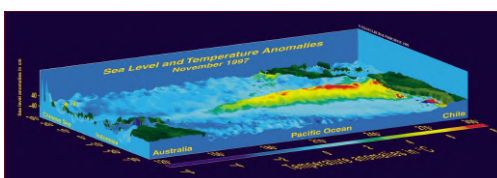


Les principales variables climatiques (en anglais ECV pour "Essential Climate Variables") sont des variables étroitement liées au climat, et relativement faciles à mesurer, dont des collections homogènes à long terme permettent de surveiller les tendances climatiques globales. Une cinquantaine ont été définies pour les diverses composantes du système climatique:

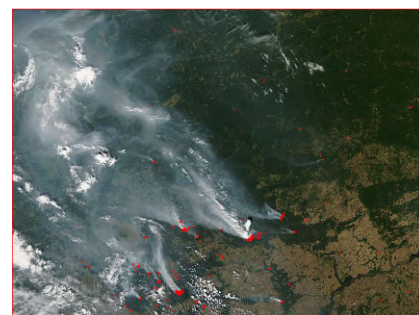
- Atmosphère: température, nuages, gaz à effets de serre, ozone, aérosols, vapeur d'eau ...
- Océans: température, niveau des mers, couleur de l'eau, banquises ...)
- Surfaces continentales: végétation, feux, calottes polaires, glaciers ...)



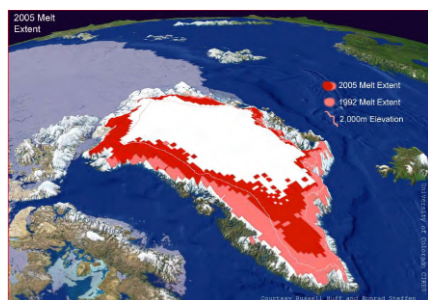
Cendres volcaniques issues de diverses éruptions



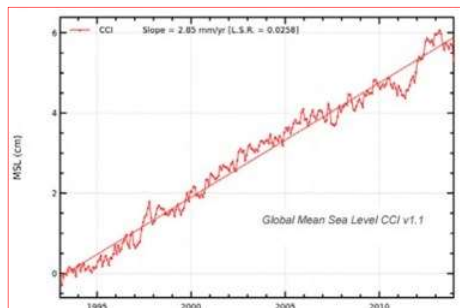
Anomalie de température et du niveau de la mer lors de l'épisode El Niño de 1997



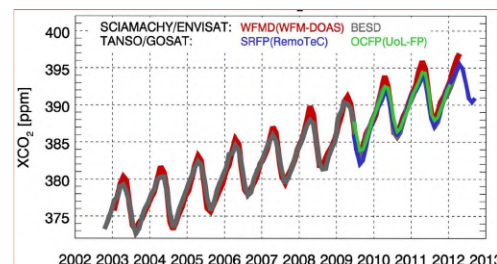
Pyroconvection lors des feux en Russie en 2010



Fonte du Groenland selon les données des satellites DMSP



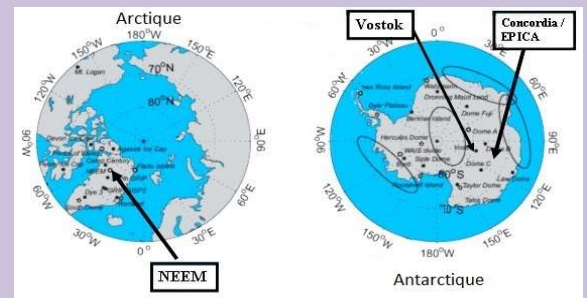
Augmentation du niveau de la mer à l'échelle globale depuis 1983 d'après les données des altimètres spatiaux



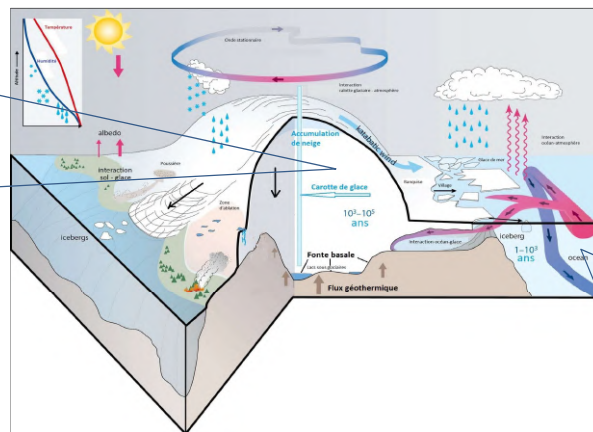
Augmentation de la concentration du dioxyde carbone dans l'hémisphère Nord selon les données satellitaires

Les régions polaires et le climat

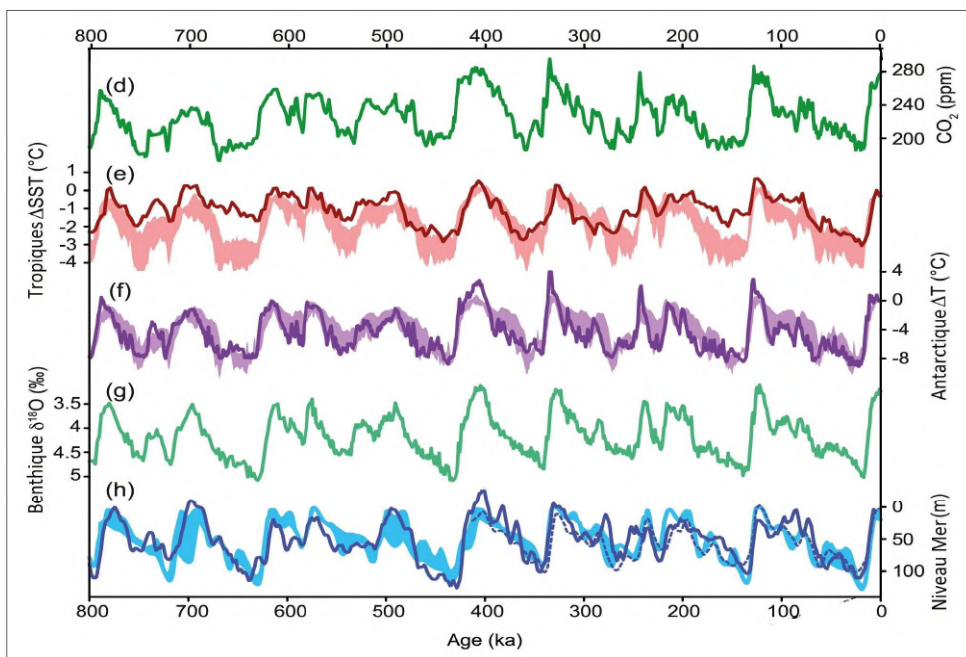
Les calottes glaciaires, principalement Groenland et Antarctique, interagissent fortement avec le climat, à des échelles de temps qui vont du mois au million d'années.



L'analyse de l'eau et des bulles d'air en fonction de leur profondeur dans les carottes de glace permet de remonter à l'âge, à la température et à la composition chimique des chutes de neige, et donc de l'atmosphère, au cours des millénaires passés

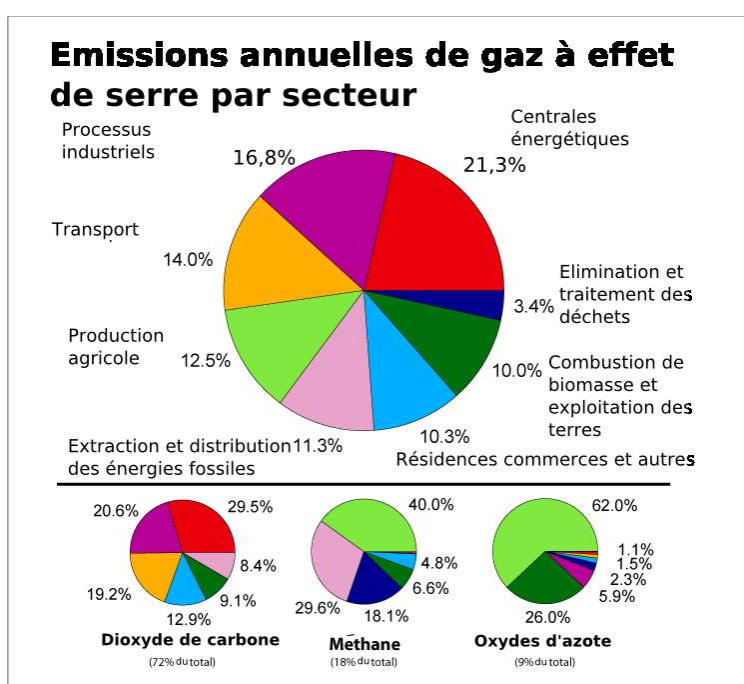


Les eaux froides Antarctiques plongent et sont remplacées en surface par des eaux plus chaudes, qui transportent de la chaleur depuis les tropiques (40% du transport total)



Le rythme des glaciations et des périodes interglaciaires (environ tous les 100.000 ans) dépend principalement des variations de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Le climat interagit alors avec la concentration des gaz à effet de serre (CO₂ ...). Il est, de plus, sensible aussi aux variations de l'activité solaire et aux modifications de l'albedo

L'origine des gaz à effet de serre

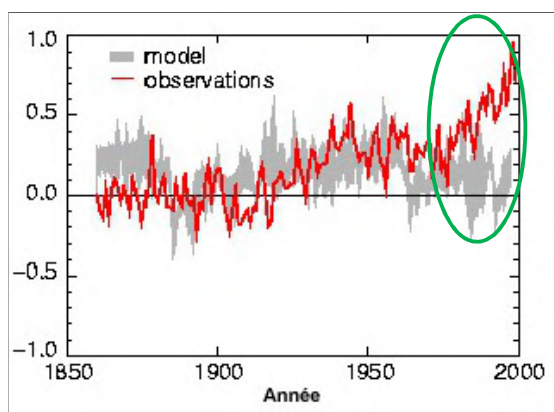


Origine anthropique des gaz à effet de serre

Concentration et puissance des gaz à effet de serre

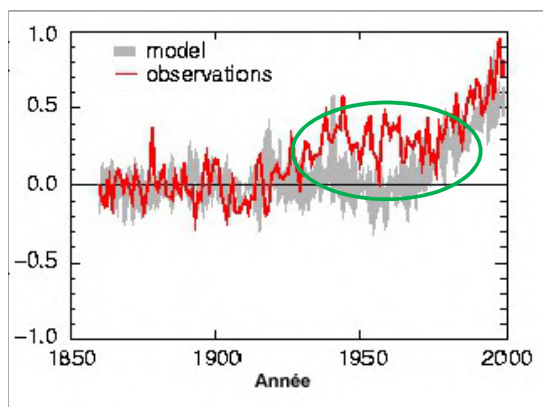
Gaz	Formule	Concentration préindustrielle	Concentration actuelle	Durée de vie dans l'atmosphère	Pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans
Vapeur d'eau	H ₂ O	3%	3%	1 à 2 semaines	-
Dioxyde de carbone	CO ₂	280ppm	396ppm	~ 100 ans (mais de 15% à 40% restera dans l'atmosphère pendant au moins un millier d'années)	1
Méthane	CH ₄	0,6 à 0,7 ppm	1,8ppm	~10 ans	25
Protoxyde d'azote	N ₂ O	0.270 ppm	0.327 ppm	~100 ans	~ 300

Les causes du réchauffement actuellement observé



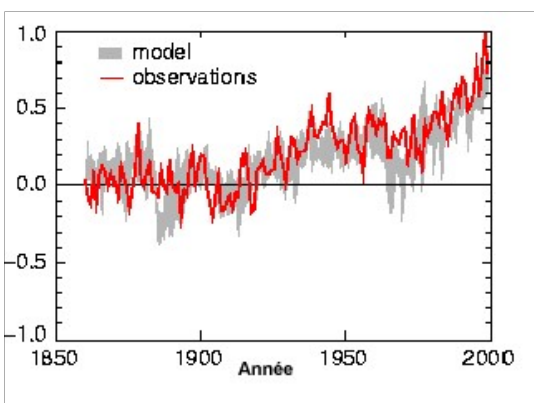
Les causes naturelles seules

La courbe **rouge** représente la variation mesurée de la température moyenne à la surface de la terre. La courbe **grise** représente la variation moyenne déduite du modèle de simulation prenant en compte les seules causes naturelles (variations du rayonnement solaire, volcanisme ...), mais en l'absence de toute augmentation de la concentration des gaz à effet de serre.



La seule augmentation des gaz à effet de serre

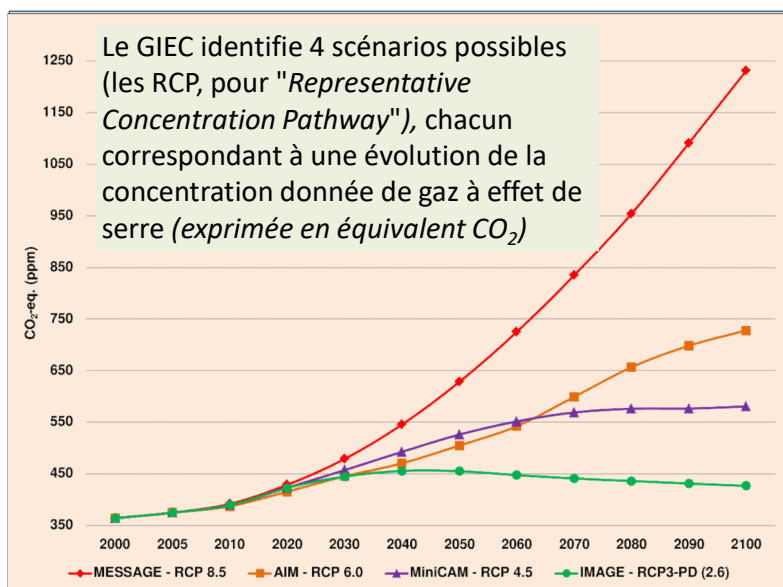
La courbe **rouge** représente toujours la même variation mesurée de la température moyenne à la surface de la terre. La courbe **grise** représente maintenant la variation moyenne déduite du modèle de simulation prenant en compte la seule augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, mais en l'absence de tout autre effet naturel (variations de rayonnement solaire, volcanisme ...)



L'ensemble de tous les effets

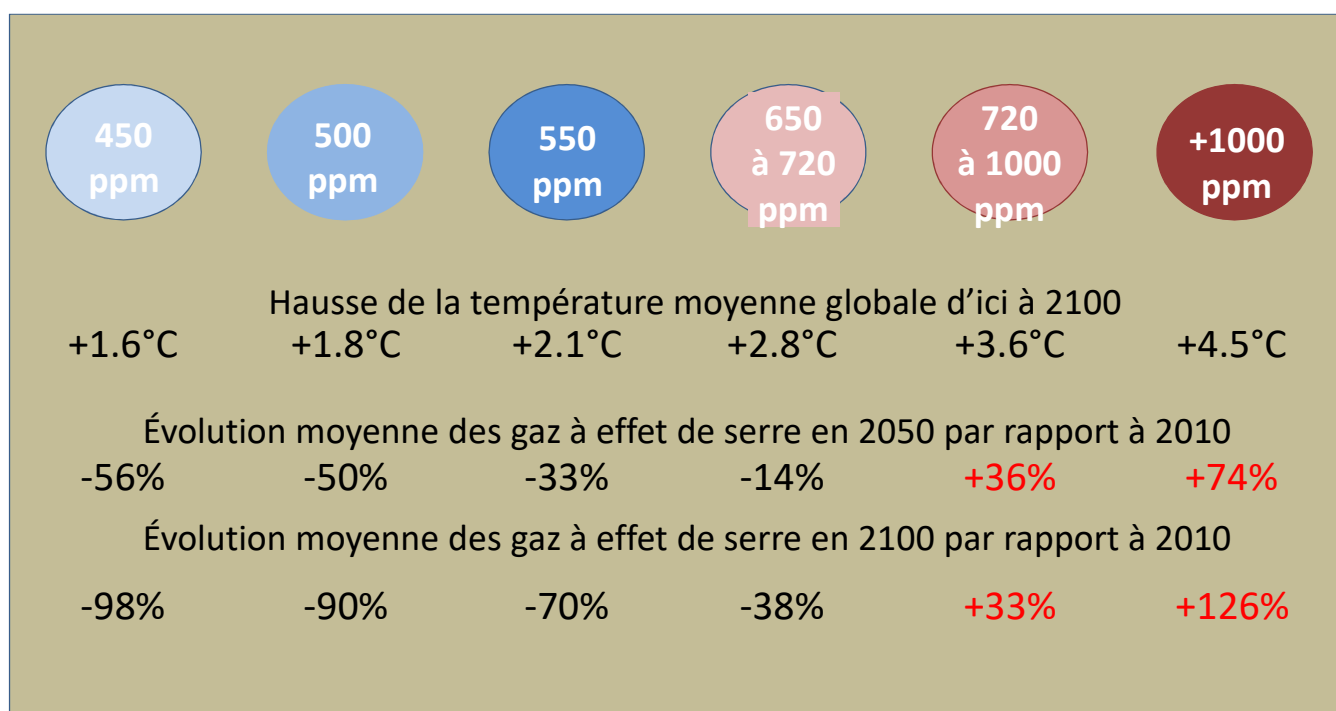
La courbe **rouge** représente toujours la même variation mesurée de la température moyenne à la surface de la terre. La courbe **grise** représente maintenant la variation moyenne déduite du modèle de simulation prenant en compte les deux types d'effets. **Elle seule restitue correctement les mesures observées depuis 1850.**

Le climat à la fin du XXI^{ème} siècle



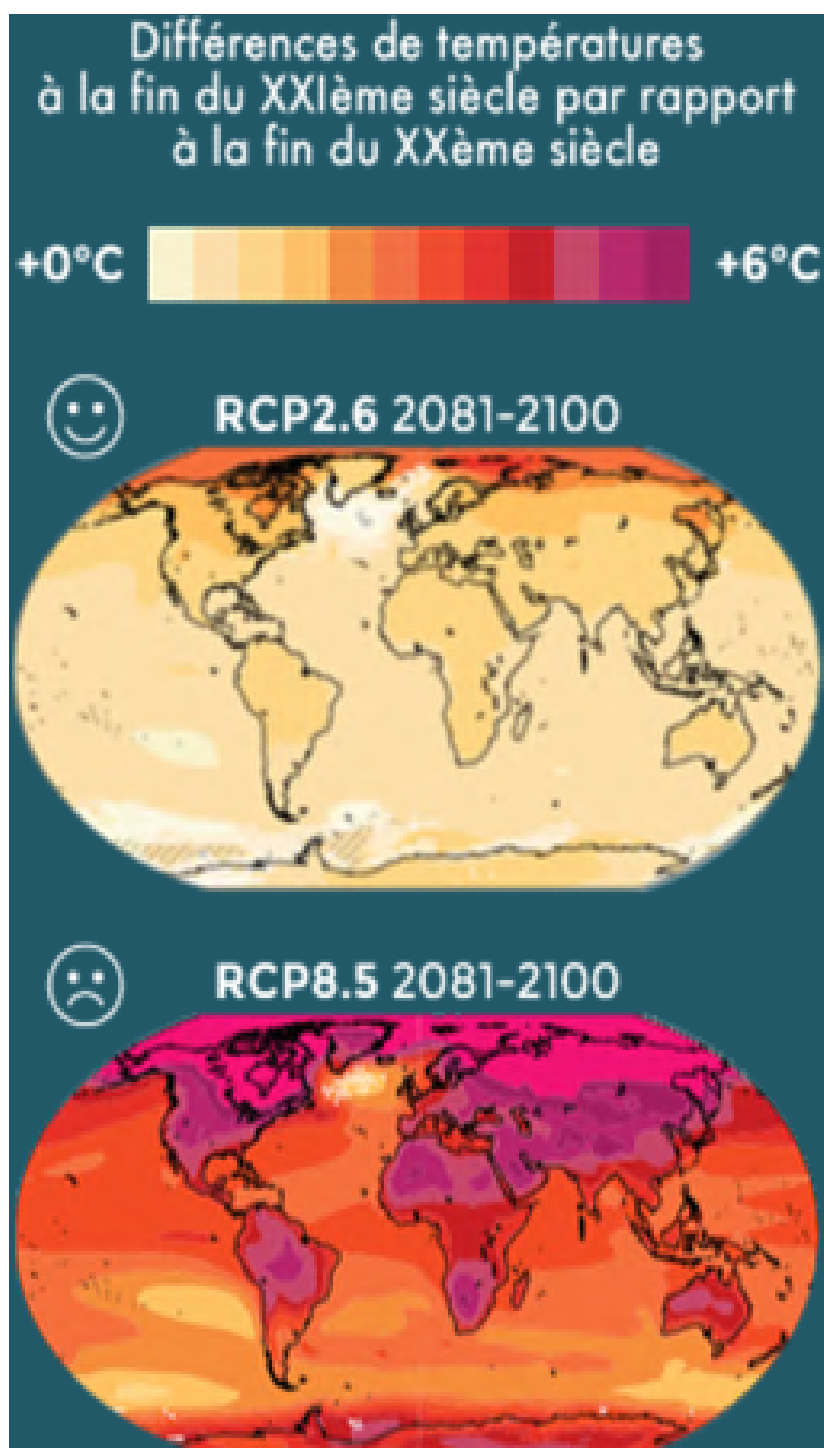
En 2009 à Copenhague, les pays du monde entier se sont mis d'accord pour limiter la hausse de la température globale à **2°C**. Au-delà de ce seuil les changements climatiques attendus auront des conséquences irréversibles sur l'environnement

Pour ne pas dépasser l'objectif de 2°C, la concentration des gaz à effet de serre (en équivalent CO₂) ne doit pas excéder 450ppm. Si la concentration devait atteindre de 530 à 650 ppm, les chances de respecter l'objectif de 2°C seraient inférieures à 50% (donc plus improbable que probable)



Evolution de la température globale en fonction de la concentration des gaz à effet de serre (équivalent CO₂)

Le climat à la fin du XXI^{ème} siècle

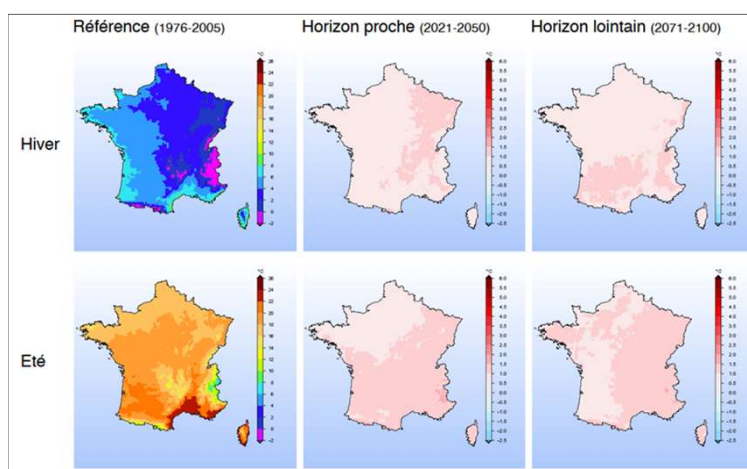


Scénario modéré:
Concentration des gaz
à effet de serre
(en équivalent CO₂)
inférieure à 450 ppm

Scénario non maîtrisé:
Concentration des gaz
à effet de serre
(en équivalent CO₂)
supérieure à 1000 ppm

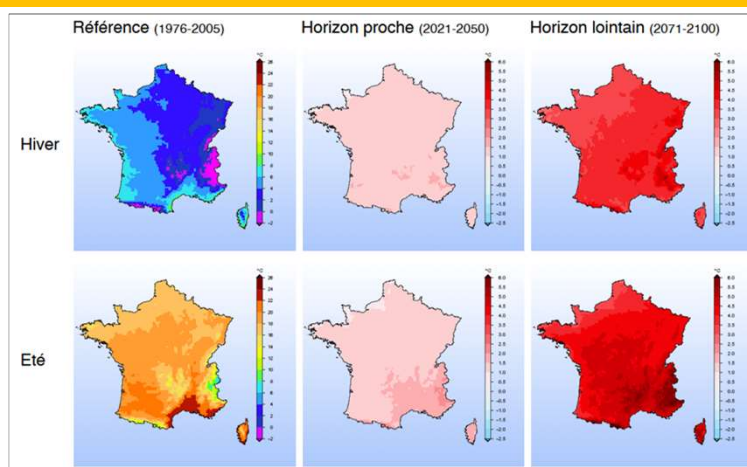
Quel climat en France au cours du XXI^{ème} siècle ?

Scenario "sobre" (RCP2.6)
pour lequel la concentration en
équivalent CO₂ ne dépasse pas
450 ppm à la fin du XXI^e siècle



Températures moyennes en hiver et en été de la période 1976-2005
(colonnes de gauche), et, par rapport à cette référence,
réchauffement climatique simulé pour **deux scénarios** à
horizon proche (2021-2050; colonnes centrales) et à
horizon lointain (2071-2100; colonnes de droite)

Scenario "laisser-faire" (RCP8.5)
pour lequel la concentration en
équivalent CO₂ dépasse
1000 ppm à la fin du XXI^e siècle

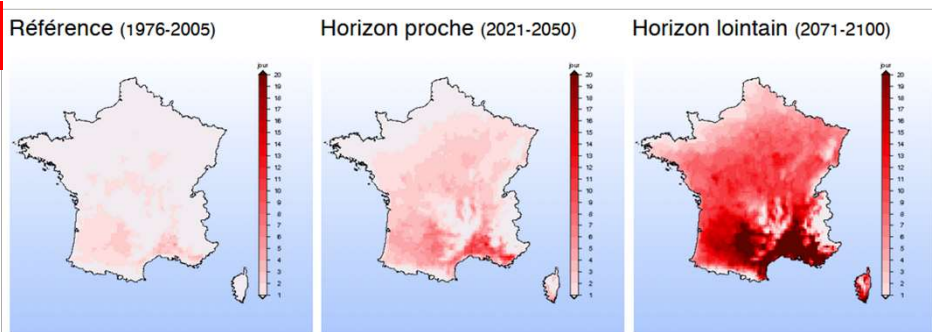


Les résultats sont établis à partir de simulations issues d'un large ensemble de modèles climatiques régionaux différents utilisés dans le cadre du projet Euro-CORDEX

Quels événements climatiques extrêmes attendus en France vers la fin du siècle?

Vagues de chaleur

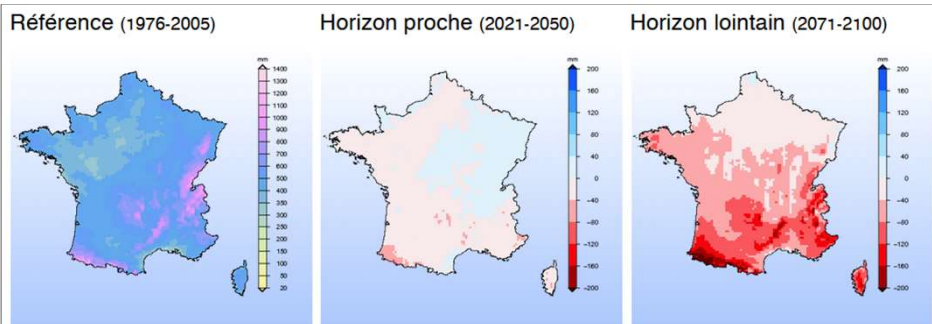
Nombre moyen de jours avec température supérieure à **35°C** pour un été de la période 1976-2005 (à gauche), et simulé à un **horizon proche** (2021-2050), au centre, et **lointain** (2071-2100), à droite, avec le scénario "laisser-faire" (RCP8.5)



Intensification des extrêmes chauds et augmentation de leur fréquence et de leur durée. Avec un scénario "sobre" (RCP2.6), l'augmentation des extrêmes chauds est similaire à un horizon proche mais se stabilise ensuite.

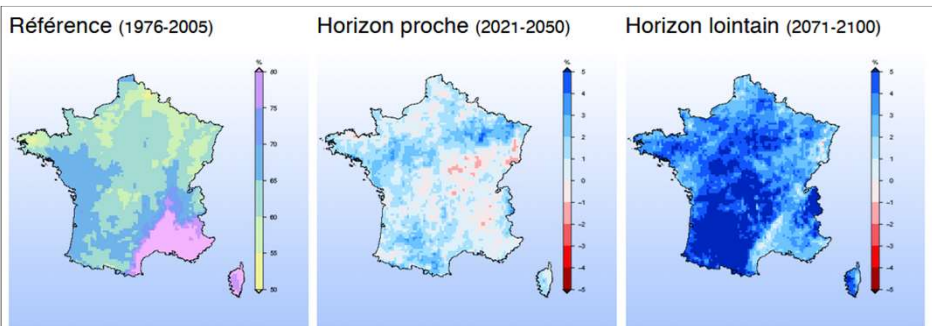
Pluies et sécheresses

Cumul moyen de précipitations d'avril à octobre de la période 1976-2005 (à gauche), et écart par rapport à cette référence des cumuls simulés à un **horizon proche** (2021-2050), au centre, et **lointain** (2071-2100), à droite, avec le scénario "laisser-faire" (RCP8.5)



Augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des sécheresses météorologiques. Sécheresses agricoles (eau du sol superficiel) et sécheresses hydrologiques (débits d'étiage) sont encore **plus marquées** (augmentation de l'évapotranspiration). Avec un scénario "sobre" (ou RCP2.6), l'augmentation des sécheresses est similaire à un horizon proche mais se stabilise ensuite.

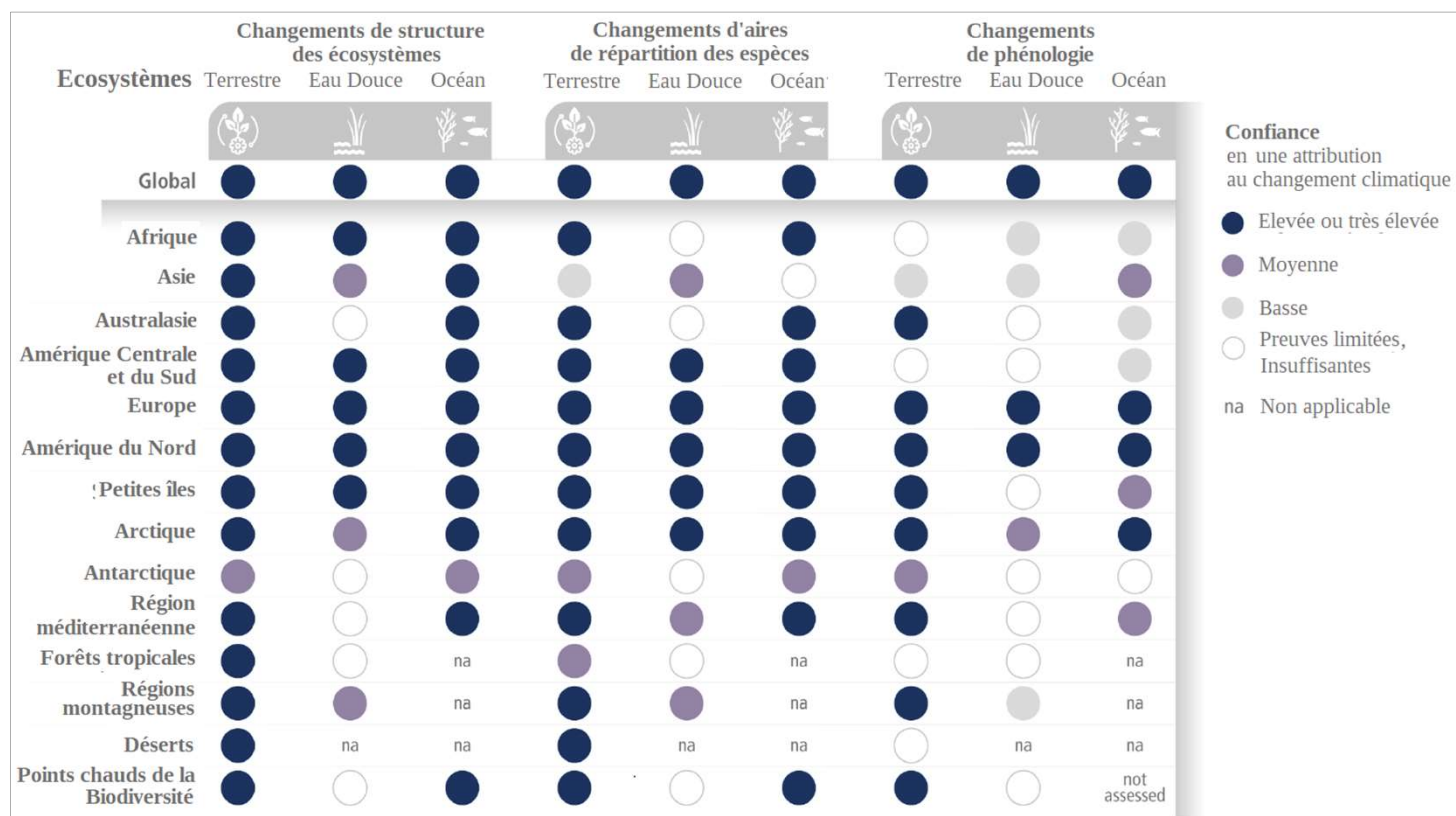
Pourcentage moyen des précipitations intenses en automne pour la période 1976-2005 (à gauche), et écart par rapport à cette référence de ce pourcentage simulé à un **horizon proche** (2021-2050), au centre, et **lointain** (2071-2100), à droite, avec le scénario "laisser-faire" (RCP8.5)



Augmentation de la fréquence des pluies extrêmes. Avec un scénario "sobre" (ou RCP2.6), l'augmentation de cette fréquence est similaire à un horizon proche mais se stabilise ensuite.

Les impacts du changement climatique - 1

Les changements climatiques induits par les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine ont eu des effets généralisés pour la nature et les personnes, allant au-delà de ceux induits par la seule variabilité naturelle du climat. Certains efforts de développement et d'adaptation ont réduit la vulnérabilité. Dans l'ensemble des secteurs et des régions de la planète, les personnes et les systèmes les plus vulnérables sont touchés de façon disproportionnée



Effets globaux et dans les différentes régions attribués aux changements climatiques anthropiques, sur la structure des écosystèmes, sur les aires de répartition des espèces et sur la phénologie

Le niveau de confiance (couleurs) reflète les incertitudes de cette attribution plus importantes à l'échelle d'une région de la planète qu'à l'échelle globale. Ces incertitudes résultent pour partie d'un nombre insuffisant d'études ou de données

Les impacts du changement climatique - 2

Les changements climatiques induits par les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine ont eu des effets généralisés pour la nature et les personnes, allant au-delà de ceux induits par la seule variabilité naturelle du climat. Certains efforts de développement et d'adaptation ont réduit la vulnérabilité. Dans l'ensemble des secteurs et des régions de la planète, les personnes et les systèmes les plus vulnérables sont touchés de façon disproportionnée

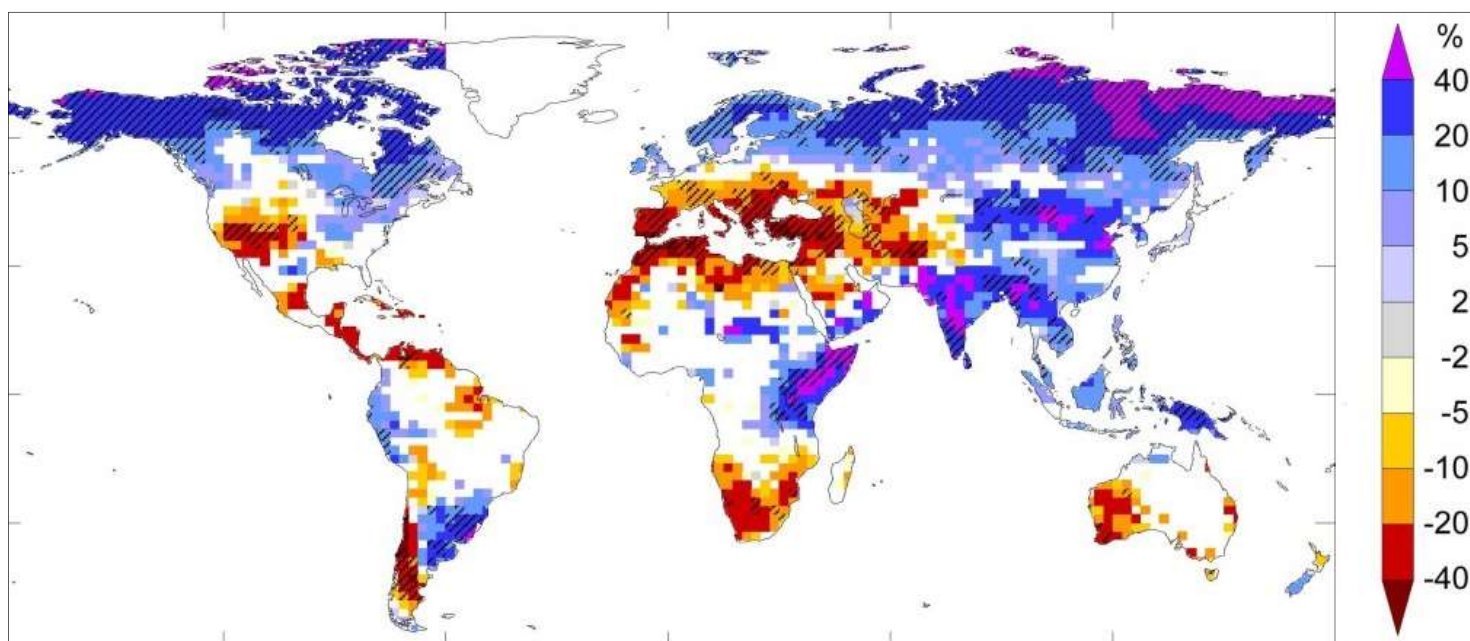
Systèmes humains	Impacts sur les pénuries d'eau et la production alimentaire				Impacts sur la santé et le bien-être				Impacts sur les villes, installations et infrastructures				Confiance en une attribution au changement climatique	
	Pénurie d'eau	Agriculture/ Production végétale	Santé animale et productivité	Rendement pêcheries et production d'aquaculture	Maladies infectieuses	Chaleur, malnutrition et autres	Santé mentale	Déplacement	Inondations et dommages associés	Dommages Inondations/ tempêtes zones côtières	Dommages infrastructures	Dommages secteurs économiques clés		
Global	±	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
Afrique	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
Asie	±	±	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
Australasie	±	-	±	-	-	-	-	non évalué	-	-	-	-	-	●
Amérique Centrale et du Sud	±	-	±	-	-	-	-	non évalué	-	-	-	-	-	●
Europe	±	±	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
Amérique du Nord	±	±	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
Petites îles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
Arctique	±	±	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
Villes proches de la mer	○	○	○	-	○	-	non évalué	-	○	-	-	-	-	●
Région méditerranéenne	-	-	-	-	-	-	non évalué	-	±	-	○	-	-	●
Régions Montagneuses	±	±	-	○	-	-	-	-	-	na	-	-	-	●

Effets globaux et dans les différentes régions attribués aux changements climatiques anthropiques sur les pénuries d'eau et la production alimentaire, la santé et le bien être, les villes, installations et infrastructures

Les symboles + et - indiquent la direction des effets observés, le - indiquant des effets néfastes croissants et le ± indiquant que globalement ou dans une région, on observe à la fois des effets néfastes croissants et des effets positifs croissants selon la nature ou la localisation de ces effets

Le changement climatique et les ressources en eau

Les ressources en eau sont le résultat d'une combinaison de processus très complexes (précipitations, évaporation des sols et transpiration des plantes, ruissellement ...). De manière générale, avec l'augmentation attendue de la température globale, la pénurie d'eau dans les zones déjà touchées par l'aridité et, ailleurs, les épisodes d'inondation devraient s'aggraver, touchant de plus grandes populations.

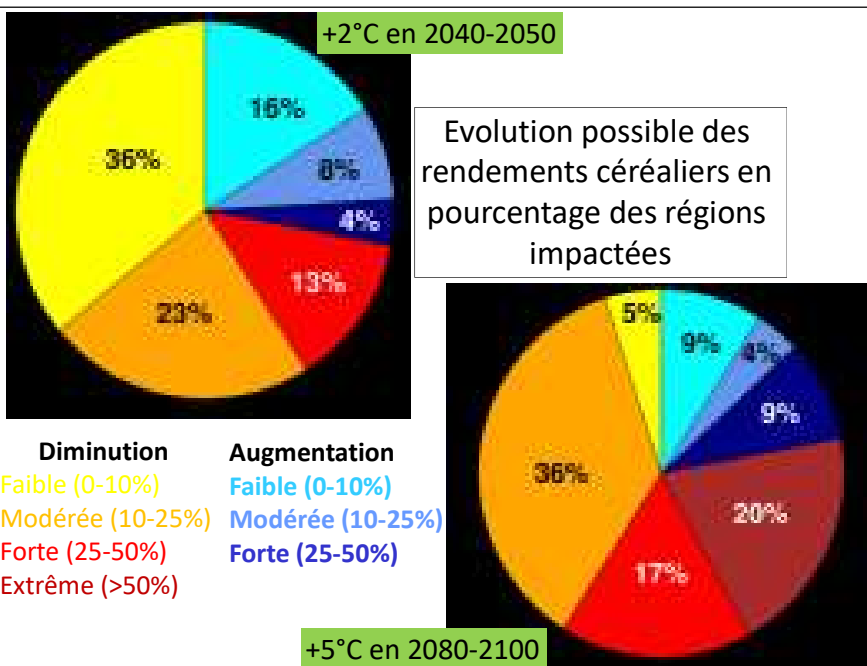


Carte des changements de ruissellement (exprimés en %) pour un réchauffement global de l'ordre de 3 °C

Pour la satisfaction des besoins en eau: un appauvrissement sensible des ressources en eaux de surface et souterraines est attendu dans des régions déjà relativement sèches (pourtour méditerranéen, Sud des Etats-Unis, Afrique du Sud, Australie etc.), en lien avec une diminution des pluies et une augmentation de l'évaporation de surface. Par contre, les ressources hydriques devraient s'accroître sous les hautes latitudes (Canada, Sibérie, Scandinavie), en réponse à des précipitations plus abondantes. Les résultats sont encore incertains sur les zones de mousson (Afrique sahélienne, Asie du Sud Est)

Le changement climatique et la production agricole

Sans mesures d'adaptation, le changement climatique aura une incidence négative sur les rendements globaux des principales cultures céréalières (blé, riz et maïs), même si certaines zones particulières risquent d'être favorisées (par exemple avec une extension des cultures vers le Nord).



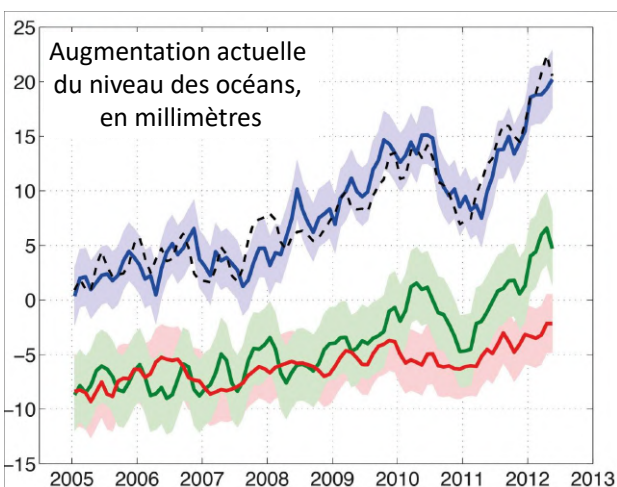
Une hausse de 2°C (en 2040-2050 dans le scénario du "laisser-faire") s'accompagnerait d'une baisse de rendement pour 72% des régions, alors que seules 28% connaîtraient une amélioration (en haut à gauche). Une hausse d'environ 5 °C à la fin de ce siècle (en bas à droite) engendrerait des risques considérables pour la sécurité alimentaire: près de 80% des surfaces connaîtraient une baisse de rendement, dont 20% avec une chute de plus de 50%. Le réchauffement devrait aussi entraîner une hausse des fluctuations d'une année sur l'autre des rendements dans plusieurs régions, augmentant sensiblement la vulnérabilité des populations. Les risques pour la sécurité alimentaire sont amplifiés dans les régions tropicales.

Le développement de l'agriculture irriguée, qui procède par des prélèvements nombreux et non régulés, fragilise la ressource en eaux souterraines et en eau potable. Dans de nombreuses régions, ce développement n'est, d'ores et déjà, pas durable, et ceci ne va que s'aggraver avec le changement climatique. La réhabilitation de techniques anciennes (galeries souterraines qui conduisent l'eau par gravité depuis les piémonts, édifices pour la récupération des eaux de pluie ...) peut permettre une première adaptation à ces nouvelles situations



Gestion de l'eau, oasis du Tafilalet.
Ouverture des vannes irriguant l'oasis

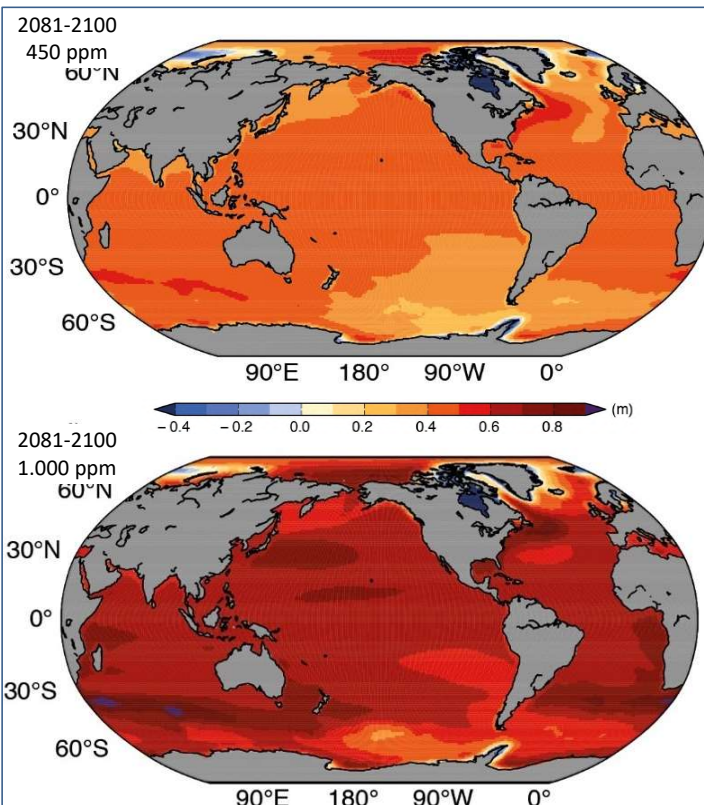
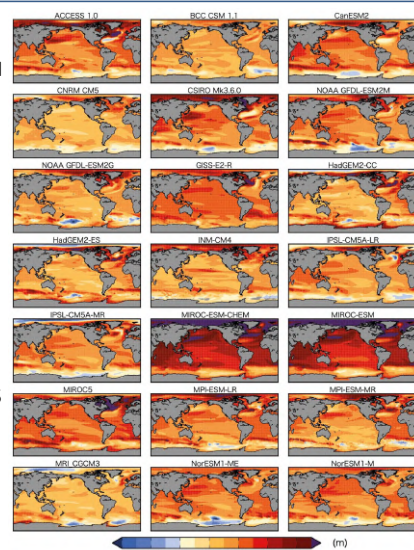
Le changement climatique et le niveau de la mer



Deux mécanismes principaux contribuent actuellement à la montée du niveau des océans (courbe bleue): la dilatation de l'eau (courbe rouge) et l'apport d'eau douce à partir de la fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires (courbe verte); la somme de ces deux effets est représentée par la courbe noire en pointillés

A l'horizon de la fin du XXI^{ème} siècle, selon le scénario d'émission des gaz à effet de serre retenu, l'augmentation du niveau des océans pourra atteindre 50 cm dans la plupart des régions du globe dans le cas du scénario RCP 2.6, avec une concentration de CO₂ alors proche de 450ppm (figure ci-contre en haut), ou près de 80 cm dans le cas du scénario RCP8.5 (figure ci-contre en bas), avec des concentrations de CO₂ dépassant alors 1.000 ppm

Les prévisions d'élévation du niveau des océans sont encore sujettes à d'assez importantes incertitudes. A titre d'exemple, les vignettes ci-contre montrent les prévisions propres à chacun des 21 modèles utilisés pour calculer l'élévation moyenne (cas du scénario 2.6)

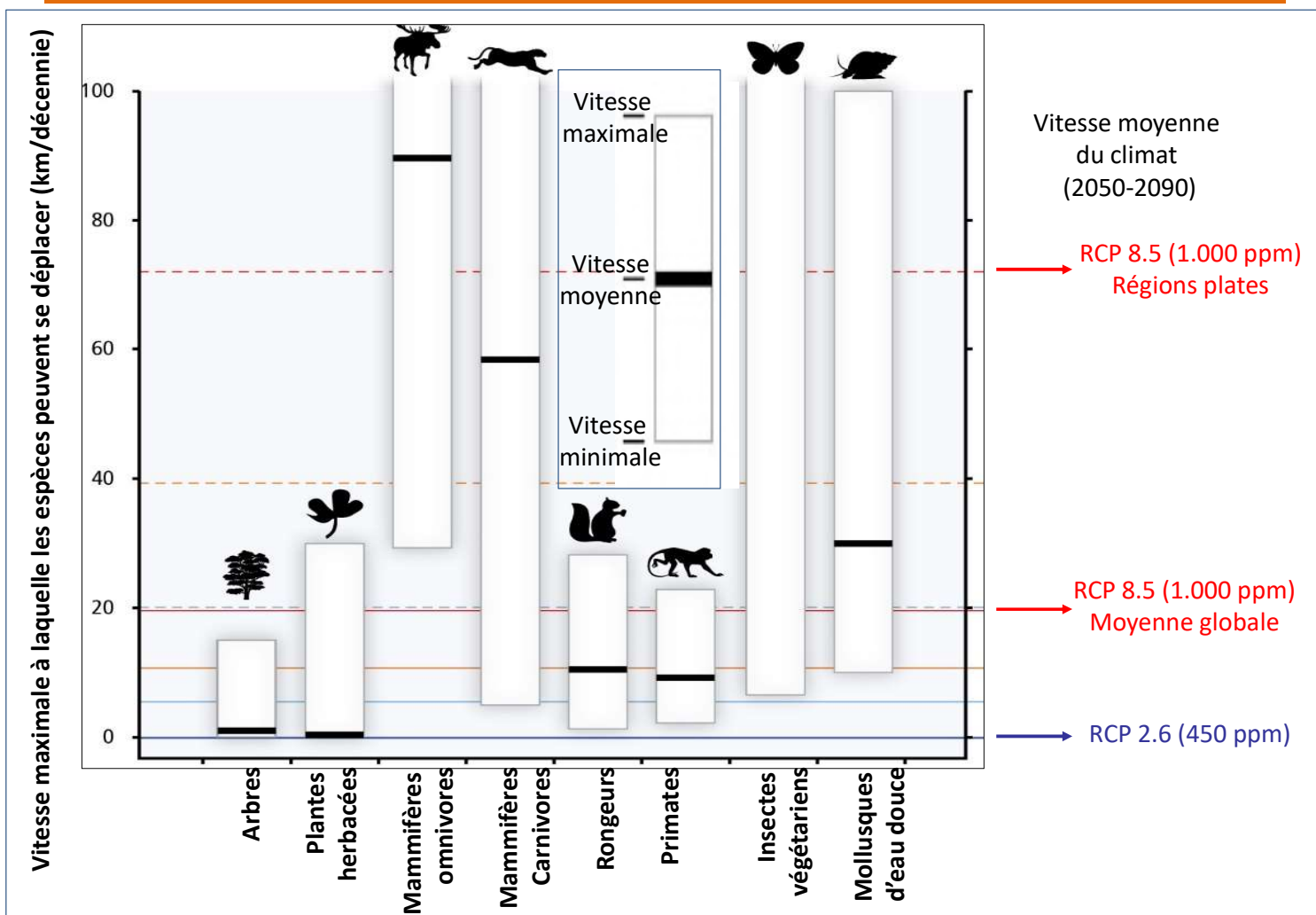


Ces résultats sont la moyenne de 21 modèles différents

Edition: Janvier 2017

Le changement climatique, la faune et la flore

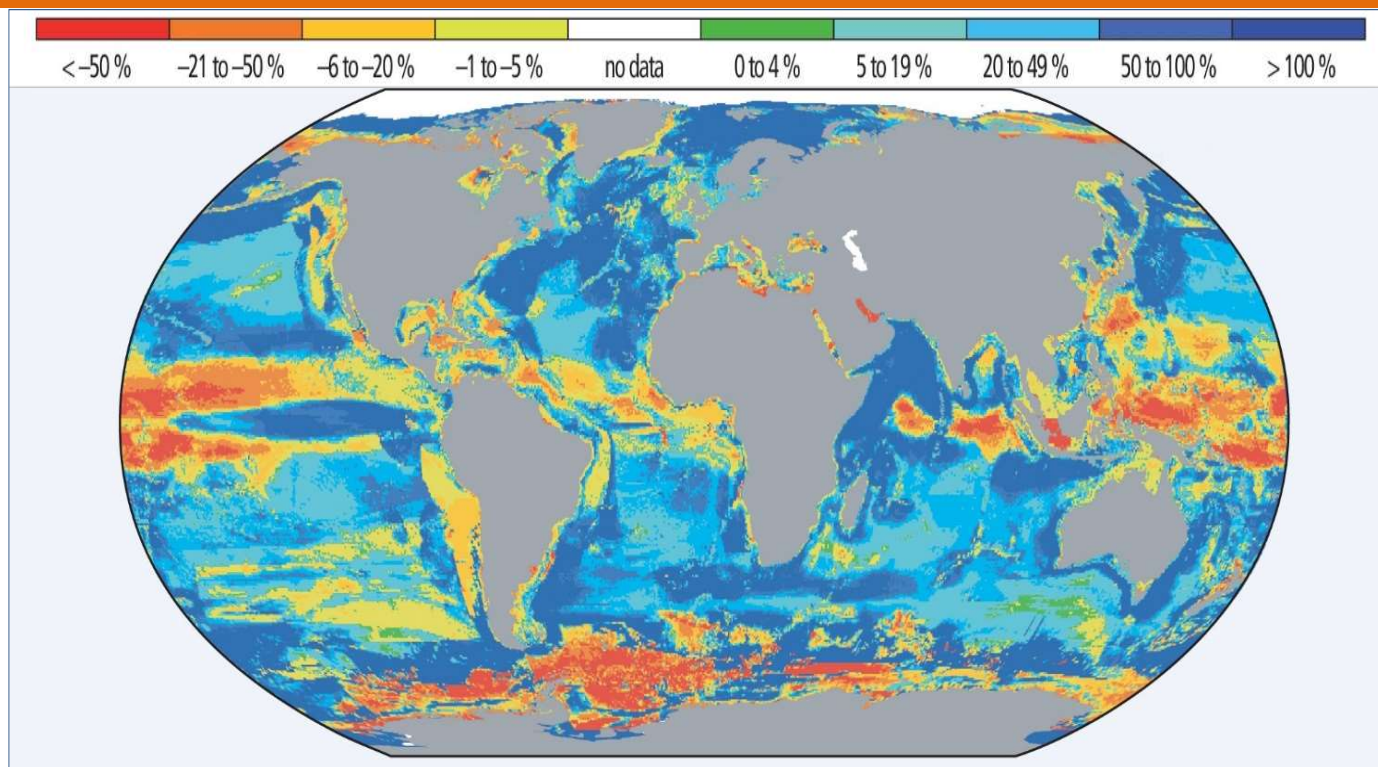
Un des problèmes principaux est d'apprécier si les êtres vivants, faune et flore, vont être capables de s'adapter au changement climatique. Il faut, à cet égard, apprécier non seulement si les nouvelles conditions seront compatibles avec la survie de ces espèces, mais aussi si celles-ci seront capables de se déplacer, vers des altitudes ou des latitudes plus élevées, pour suivre leur optimum climatique. La vitesse du changement climatique est le paramètre crucial, selon qu'elle excède ou non la vitesse de migration possible pour les différentes espèces



Le changement climatique et la pêche

Avec le réchauffement progressif des eaux océaniques, les différentes espèces de poissons et d'invertébrés vont migrer vers les latitudes plus élevées: vers l'Arctique dans l'hémisphère nord, et vers l'Antarctique dans l'hémisphère sud.

En conséquence la production halieutique va baisser dans la ceinture équatoriale, au bénéfice des latitudes tempérées. De plus, la diminution attendue de production de plancton dans les eaux antarctiques aura pour effet de réduire la population des espèces situées plus en aval dans la chaîne alimentaire.



Variations du potentiel de captures du millier d'espèces les plus pêchées (poissons et invertébrés) entre 2001-2010 et 2051-2060, dans le cas d'une augmentation de 2° de la température par rapport à l'époque préindustrielle.

Ces variations sont calculées à partir de l'évolution prévue pour les conditions physiques (température notamment) et pour la production primaire nette (NPP) de l'océan; elles ne tiennent pas compte d'éventuelles surpêches, ni de l'évolution à la baisse du pH océanique.

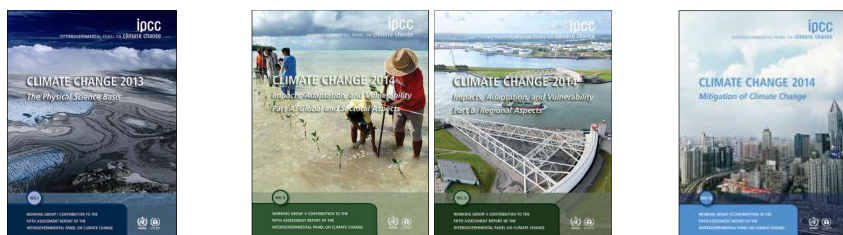
Le fonctionnement du GIEC

Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), en anglais IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) a été créé en 1988 sous l'impulsion des scientifiques climatologues. Il fournit régulièrement des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques (CC), leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade.

Le GIEC a produit entre 1990 et 2023 six rapports complets d'évaluation et une vingtaine de rapports méthodologiques ou spéciaux (les énergies renouvelables, les sols et l'alimentation, les océans et les glaces , ...)



Le GIEC est organisé en 3 groupes de travail (WG), qui chacun élabore une partie du rapport global:
 WG1 - les bases scientifiques du CC
 WG2 - les impacts du CC, adaptation, vulnérabilité
 WG3 - mitigation et CC



Quelques dates:
 1990: 1^{er} rapport
 1992: Conférence de Rio
 2005: Protocole de Kyoto
 2013-14: 5^{ème} rapport
 2015: COP21 à Paris

L'élaboration du 6^{ème} rapport: 782 auteurs au total, 1.586 contributeurs, plus de 200.000 commentaires de relecture

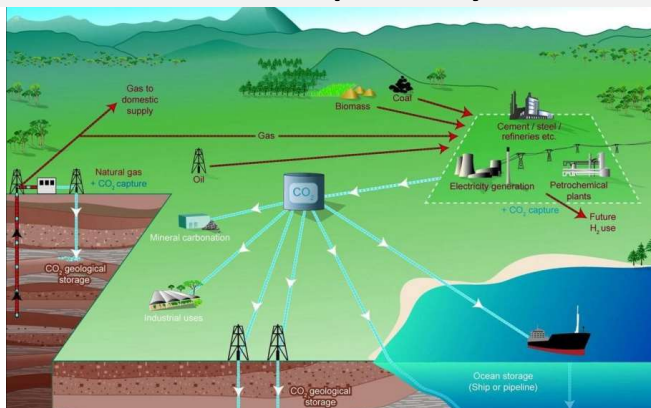
Une phrase clef du rapport 2022
 Il est sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, l'océan et les terres

Le GIEC et l'ex-Vice-Président des États-Unis d'Amérique, Al Gore, ont reçu le **Prix Nobel de la paix en 2007** pour leur contribution dans le domaine des changements climatiques.

Captage, stockage et valorisation (CCUS)

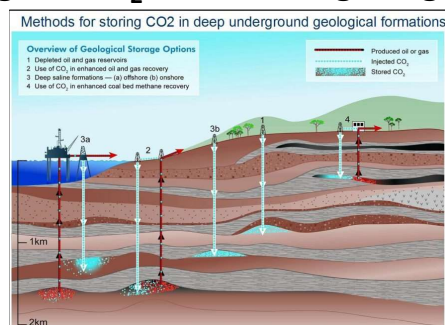
En complément à la nécessaire réduction des émissions, il est profitable de capter le dioxyde de carbone (CO_2) directement sur ses lieux d'émission, en particulier industriels, puis de le concentrer et, soit de le stocker de façon aussi pérenne que possible, soit de le réutiliser. Ces techniques sont souvent désignées sous le vocable CCUS (pour Carbon Capture, Utilization and Storage)

Représentation schématique des systèmes CCUS



La réutilisation du CO_2 capté est possible après transformation en monoxyde de carbone (CO), à condition de disposer d'une importante source d'énergie (décarbonée!). Le CO est par exemple combinable avec l'hydrogène (décarbonée !) pour produire des carburants de synthèse

Stockage du CO_2 en couches géologiques



Le stockage dans le sous-sol est conçu afin d'isoler de façon pérenne le CO_2 et l'atmosphère. Ce stockage peut se faire dans des aquifères marins ou dans des puits d'hydrocarbures en fin d'exploitation

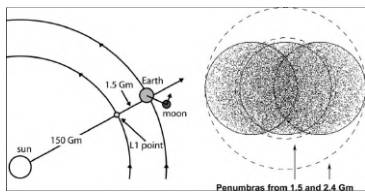
Le GIEC estime que l'accélération du captage et du stockage du CO_2 , que ce soit pour en réduire les émissions industrielles ou pour en retirer directement de l'atmosphère, doivent faire partie des solutions

L'ingénierie climatique - 1

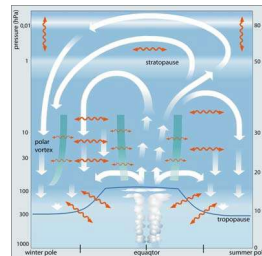
Dans l'hypothèse où la réduction des émissions des gaz à effet de serre ne se ferait pas assez rapidement, ou bien dans le cas où le dérèglement climatique s'accélérerait de façon beaucoup trop dangereuse, deux familles de "solutions" ont été proposées, qui utilisent des **technologies** de lutte contre l'effet de serre plutôt que la seule réduction des émissions.

La gestion du rayonnement solaire

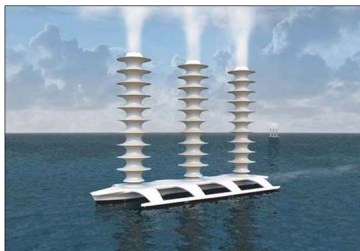
(ou SRM, pour Solar Radiation Management)



Réfléchir le rayonnement solaire avant qu'il n'entre dans l'atmosphère, en installant des réflecteurs dans l'espace



Réfléchir le rayonnement solaire dans la haute atmosphère en y injectant des aérosols pour imiter l'effet «refroidissant» des particules émises lors des grosses éruptions volcaniques



Réfléchir le rayonnement solaire en rendant plus brillants, et donc réfléchissants, les nuages dans la basse atmosphère au-dessus des océans



Rendre la surface terrestre plus réfléchissante (peinture des toits, miroirs, ...)

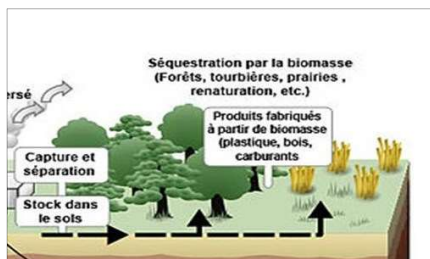
Des méthodes de tout dernier recours car pour certaines beaucoup d'effets induits (rétroactions) restent inconnus. En toute hypothèse des méthodes de mise en œuvre très coûteuse, voire irréalisables dans un avenir proche

L'ingénierie climatique - 2

Dans l'hypothèse où la réduction des émissions des gaz à effet de serre ne se ferait pas assez rapidement, ou bien dans le cas où le dérèglement climatique s'accélérerait de façon beaucoup trop dangereuse, deux familles de "solutions" ont été proposées, qui utilisent des **technologies** de lutte contre l'effet de serre plutôt que la seule réduction des émissions.

L'extraction et le stockage du gaz carbonique

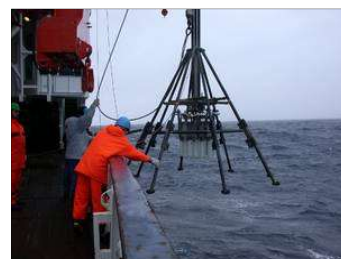
(ou CDR, pour Carbon Dioxide Removal)



Augmenter le stockage du CO₂ par la biosphère terrestre, par reforestation, meilleur usage des sols, ...



Extraire le CO₂ de l'atmosphère par aspiration de l'air puis adsorption ou solution suivies de concentrations par voies chimiques

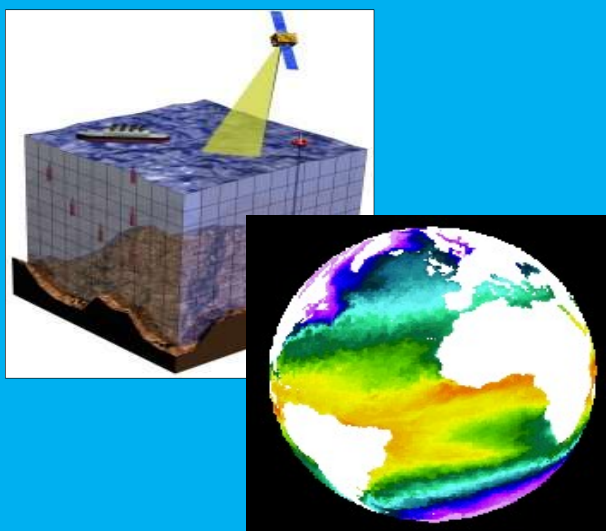


Accélérer l'absorption du CO₂ par la biosphère marine en lui fournissant un supplément de nutriments (Fe)

Une méthode non maîtrisée (biosphère marine), mais les autres techniques peuvent s'avérer des compléments utiles à la réduction des émissions

La prévision météo-climatique du futur

L'état de l'océan sera alors observé, analysé, modélisé et prévu de façon opérationnelle et en continu, comme pour l'atmosphère.



Le suivi opérationnel s'étendra à d'autres composantes du système climatique : chimie de l'atmosphère et biochimie des océans, occupation des sols et biomasse, hydrologie, glaciologie...



Une variété de modèles de plus en plus grande se développera, certains traitant l'ensemble du système climatique, d'autres seulement des sous-ensembles plus ou moins grands. Beaucoup de ces modèles seront couplés avec des modèles applicatifs (suivi de la production d'énergie, gestion des transports, gestion de la ville...). Ces modèles permettront en particulier de fournir des services climatiques, qui se développeront alors rapidement. Pour les services météorologiques traditionnels, ces modèles applicatifs s'appuieront de plus en plus sur des prévisions probabilistes (par exemple : probabilité de dépassement d'un seuil de précipitation locale), et ce d'autant plus que l'échéance de la prévision s'allongera.

La prévision météo-climatique est ainsi appelée dans le futur à traiter (de façon cohérente) toutes les échelles de temps depuis l'ordre quelques minutes (prévision immédiate) jusqu'au millénaire (projections climatiques). Les développements dépendront étroitement du développement des super-calculateurs. La prévision immédiate et à très court terme restera la plus exigeante en ressources de calcul, de traitement et de transmission de l'information.