

L'exposition « La météorologie et le climat »

L'exposition présente, à travers de nombreux panneaux explicatifs, les grandes questions qui touchent à l'atmosphère, à la prévision météorologique, au climat et au changement climatique. Les panneaux sont regroupés en 3 ensembles.

L'atmosphère et le climat : quelques concepts généraux

L'atmosphère, et plus généralement le système climatique, sont présentés dans un ensemble de 6 panneaux. L'atmosphère, en interaction avec les autres composantes du système climatique (océan, glace, végétation, ...), est présentée sur le panneau n°14, tandis que les panneaux n°19 et 22 détaillent l'effet de serre, dont l'accroissement dû aux activités humaines est responsable du dérèglement climatique annoncé et constaté (panneau n°23). La complexité des phénomènes climatiques est évoquée sur le panneau n°15, à travers l'ensemble des interactions (appelées «rétroactions») entre tous les phénomènes physiques qui, à un stade ou à un autre, interviennent pour piloter l'organisation et l'évolution du climat. Le rôle de l'océan est particulièrement important (panneau n°16), via par exemple le phénomène El Niño (panneau n°17). Les pionniers, météorologues et climatologues, qui ne possédaient pas encore les outils avancés qui sont les nôtres aujourd'hui, ont jeté les bases de l'étude de l'atmosphère et du climat (panneau n°1).

La prévision météorologique et ses outils

Prévoir le comportement de l'atmosphère, en particulier à quelques jours d'échéance mais aussi à plus long terme pour l'étude du climat, nécessite d'avoir recours à des modèles de simulation numérique qui permettent de synthétiser la connaissance des phénomènes et des lois qui les gouvernent (panneau n°4). La prévision météorologique requiert de plus une analyse fine de l'état du temps présent (panneau n°12), mais elle n'est possible de façon déterministe que jusqu'à la limite de prévisibilité (panneau n°13). Les modèles de prévision numérique, tels ceux utilisés en France (panneau n°5), ont permis une amélioration constante de la fiabilité des prévisions (panneau n°11). Le panneau n°6 décrit un domaine particulier, celui de la prévision à très courte échéance (prévision «immédiate»), tandis que le panneau n°18 présente la prévision aux échéances saisonnières (de 1 à 3 mois à l'avance). Mais les modèles ne peuvent fonctionner que correctement alimentés par les données d'observation, que celles-ci proviennent des réseaux d'observation classiques (panneau n°2) ou des satellites dédiés (panneau n°3). La prévision météorologique est utile dans de très nombreux domaines spécialisés, tels l'aviation (panneau n°7), les activités maritimes (panneau n°8), ou d'autres domaines tels l'énergie, l'agriculture, les transports terrestres (panneau n°9). Elle est aussi source de protection des biens et des personnes à travers les procédures de vigilance (panneau n°10).

Le climat et son évolution

L'observation satellitaire permet aussi de caractériser l'évolution du climat au cours des toutes récentes décennies (panneau n°20). C'est sous l'égide du GIEC (panneau n°34) que cette évolution est suivie au niveau international : parmi d'autres paramètres, les températures globales (panneau n°24) et régionales (panneau n°25) font l'objet d'études coordonnées internationalement par de nombreux groupes de recherche. Des zooms plus fins sont possibles sur l'Europe occidentale et la France, tant pour les températures que pour les précipitations (panneau n°26). L'augmentation des épisodes extrêmes, comme les canicules et les fortes précipitations hivernales, sont aussi étudiées (panneau n°27). Si, aux confins de la planète, les régions polaires jouent un rôle très spécifique dans l'évolution climatique (panneau n°21), les impacts du changement climatique en cours et futur se font sentir sur l'ensemble du globe (panneau n°28). Une série de panneaux présente les impacts du changement climatique sur les ressources en eau (n°29), la production agricole (n°30), la montée du niveau des océans (n°31), la faune et la flore (n°32), la pêche (n°33). Pour combattre ces effets, faut-il pour autant se lancer dans la géo-ingénierie climatique (panneau n°35) ?

D'autres itinéraires de consultation des panneaux sont bien entendu possibles, chacun d'entre eux pouvant être consulté de façon autonome.

Ces panneaux ont été réalisés par la section Midi-Pyrénées de la société «Météo & Climat» (toulouse@meteoetclimat.fr)

LISTE DES POSTERS DE L'EXPOSITION « LA METEOROLOGIE ET LE CLIMAT »

1. Le temps des Pionniers
2. Le réseau d'observation
3. Les satellites pour la météorologie et le climat
4. Comment fonctionne un modèle numérique de prévision du temps ?
5. Les modèles français utilisés pour la prévision du temps
6. La prévision immédiate
7. Aviation et météorologie
8. La météorologie marine
9. La prévision météorologique est appliquée à...
10. La vigilance météorologique
11. Les progrès récents de la prévision du temps
12. Les modèles numériques pour la météorologie et le climat
13. Effet papillon et météorologie
14. Le système climatique
15. Forçages et rétroactions climatiques
16. L'océan et le climat
17. Le phénomène El Niño
18. Prévision mensuelle et saisonnière
19. L'effet de serre
20. L'apport des satellites au suivi du changement climatique
21. Les régions polaires et le climat
22. L'origine des gaz à effet de serre
23. Les causes du réchauffement actuellement observé
24. Le climat à la fin du XXIe siècle
25. Le climat à la fin du XXIe siècle
26. Quel climat en France au cours du XXIe siècle ?
27. Quels événements climatiques extrêmes attendus en France vers la fin du siècle ?
28. Les impacts du changement climatique
29. Le changement climatique et les ressources en eau
30. Le changement climatique et la production agricole
31. Le changement climatique et le niveau de la mer
32. Le changement climatique, la faune et la flore
33. Le changement climatique et la pêche
34. Le fonctionnement du GIEC
35. La géoingénierie climatique
36. La prévision météo-climatique du futur

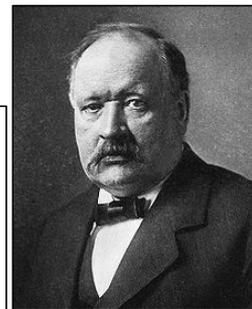


Le temps des pionniers

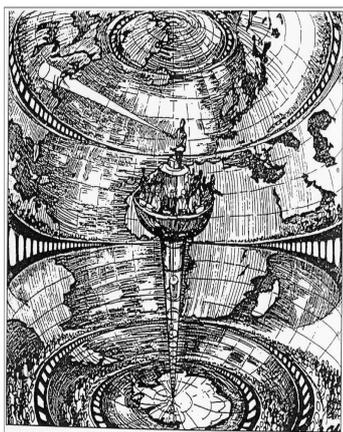


Joseph Fourier, 1824: *Les gaz de l'atmosphère terrestre augmentent la température à sa surface*

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



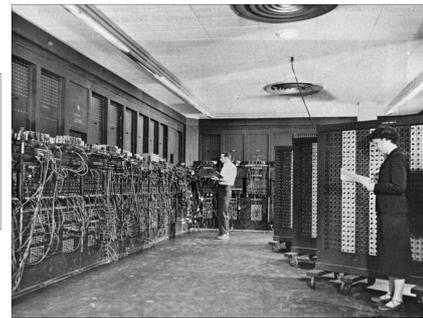
Urbain Le Verrier : Crée le réseau météorologique après la tempête qui a détruit une partie de la flotte impériale de Crimée en **1854**



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

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).

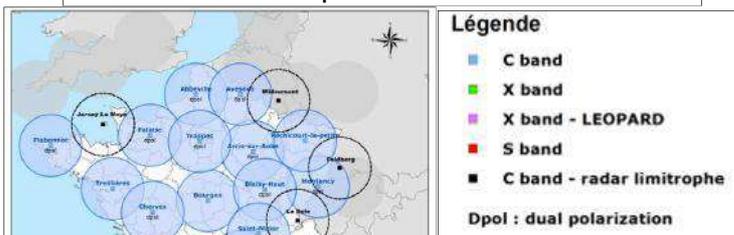
Ce réseau terrestre est complété par de nombreux instruments satellitaires



1.800 stations temps réel de la France métropolitaine, 300 de Météo-France et 1.500 stations partenaires

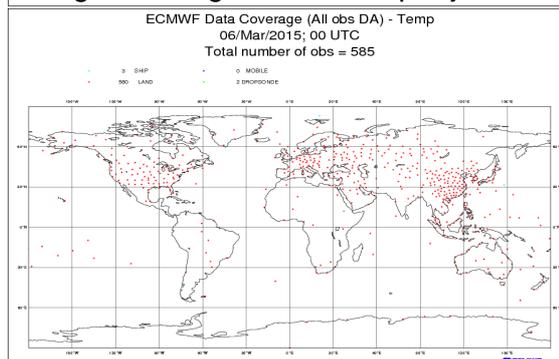


Le réseau métropolitain de radars en 2015



Les 1.800 stations au sol "temps réel" sur la France métropolitaine : 300 stations de Météo-France et 1.500 stations partenaires

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



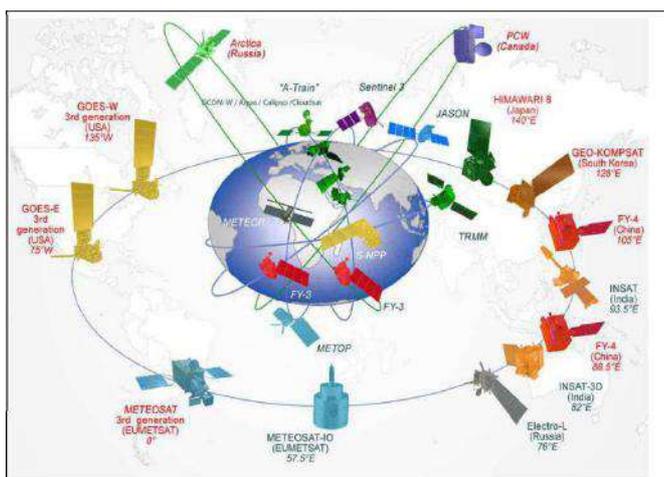
Les satellites pour la météorologie et le climat

Les satellites apportent une vision globale, homogène et continue de la planète Terre. 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.

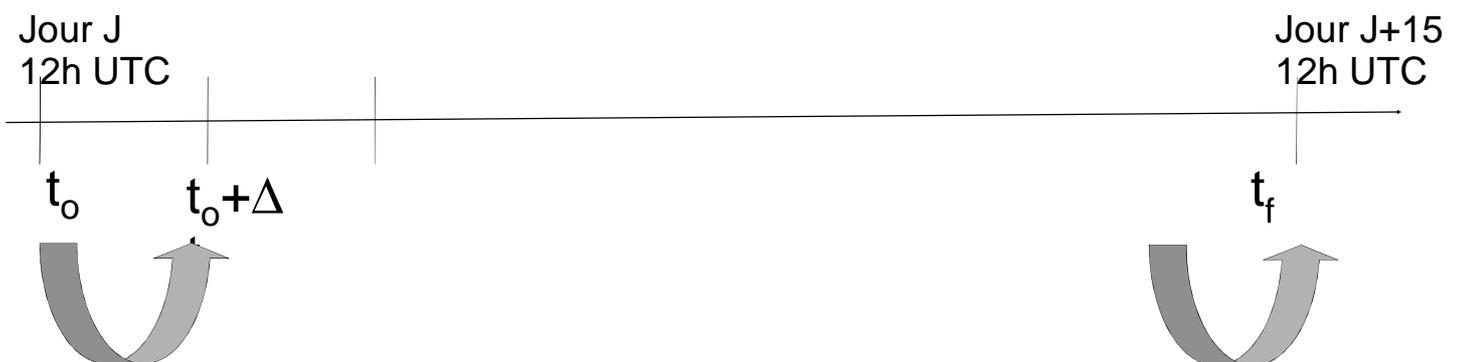
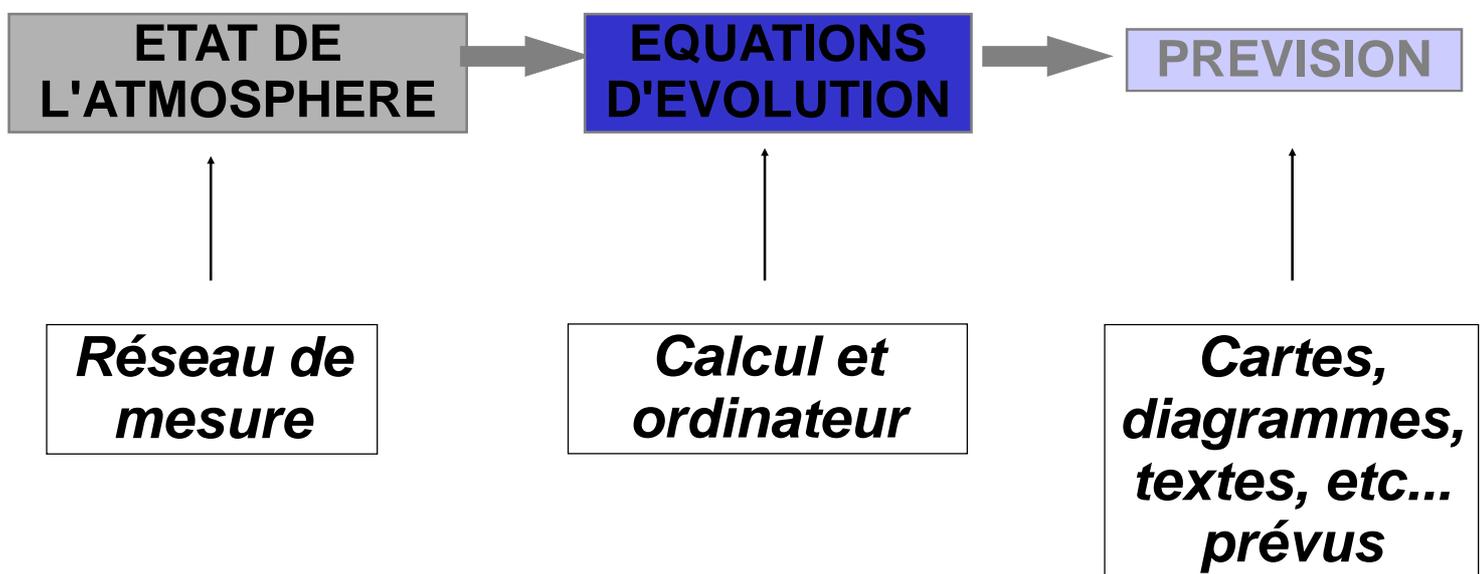


Vue simplifiée du système mondial d'observation satellitaire envisagé pour les décennies 2020-30



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, diffusomètres; 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

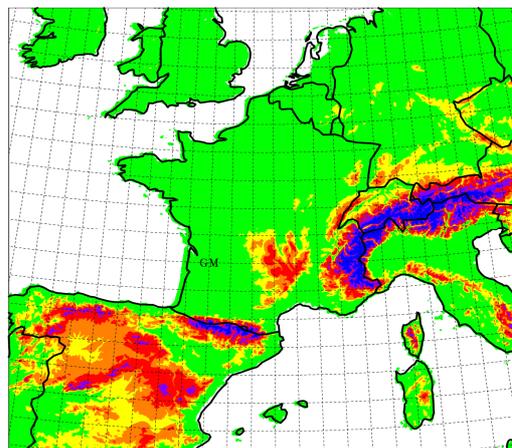
Le modèle européen appelé «IFS» (CEPMMT) fournit 2 fois par jour des prévisions jusqu'au jour 15, sur tout le globe, à une résolution horizontale de l'ordre de 10 à 15km

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 7km 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



De plus, 4 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 certains modèles une version dite « d'ensemble » ou probabiliste, permettant d'estimer l'incertitude associée aux analyses et prévisions météorologiques



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

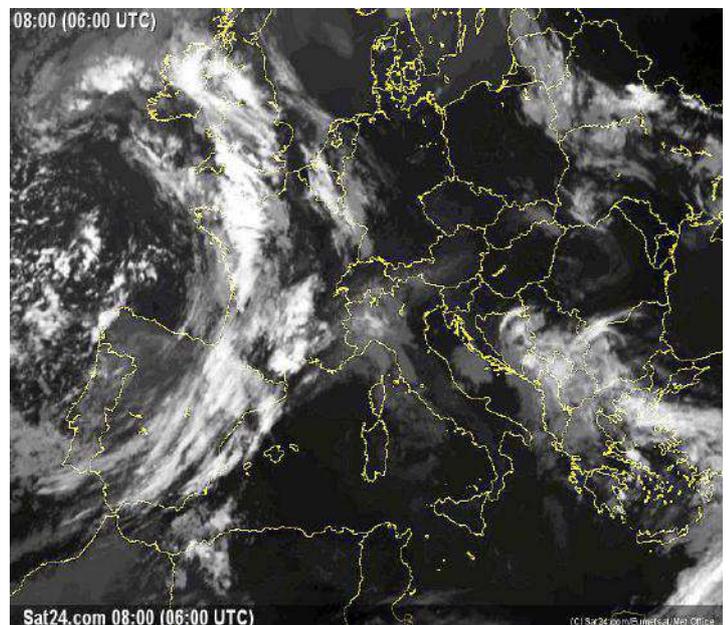
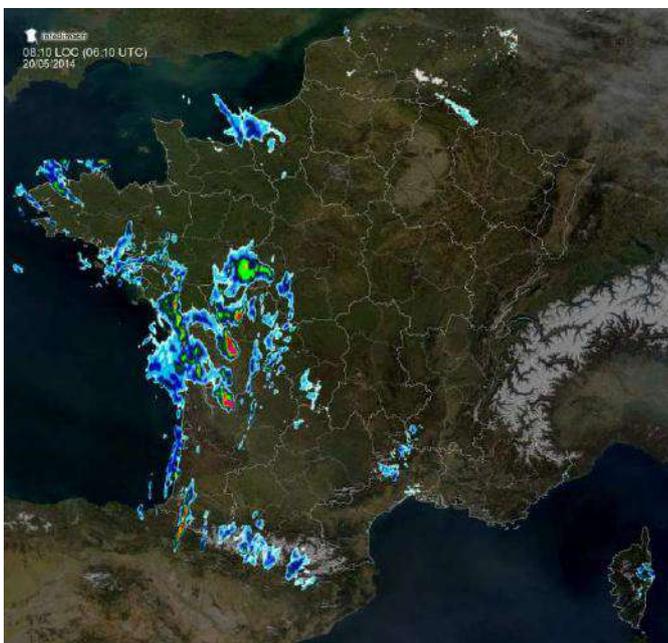
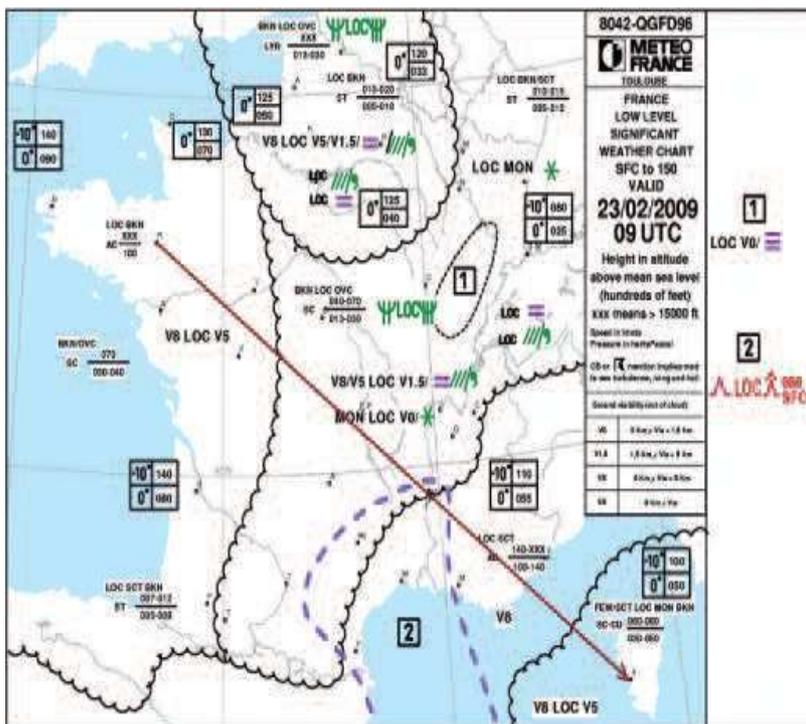


Image radar (réseau Météo-France) et image infrarouge du satellite Météosat, documentant une situation pluvieuse sur l'Ouest du territoire métropolitain (20 mai 2014, matin)

Aviation et météorologie

L'aviation utilise les prévisions météorologiques pour

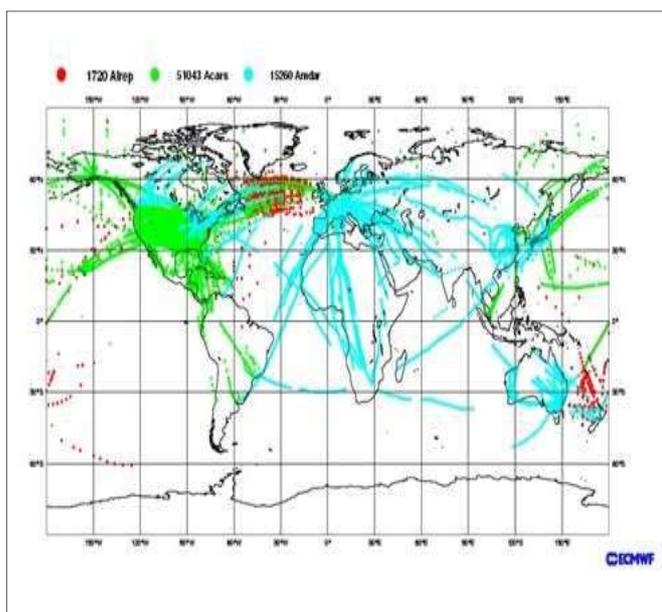
- la planification des vols, en particulier pour l'optimisation des itinéraires et de la consommation, en fonction du vent et de la température;
- l'identification des phénomènes dangereux tels les cumulo-nimbus et le givrage, la turbulence en ciel clair, les panaches de cendres volcaniques, etc ...



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

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

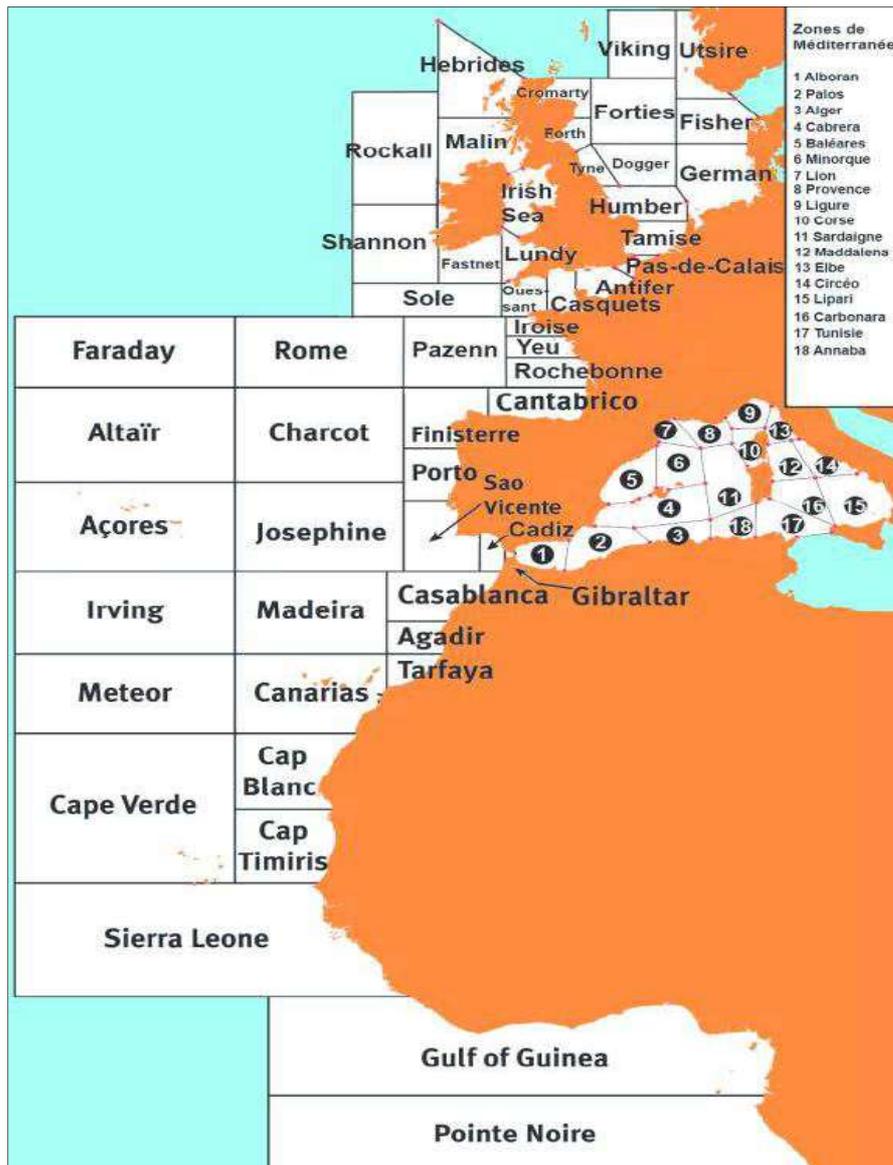
Les avions eux-mêmes collectent des informations pour leur propre sécurité (radar de bord pour détecter orages violents et grêle). Nombre d'avions commerciaux sont aussi équipés pour fournir en temps réel des observations *in situ* (vent, température, humidité)



Exemple de couverture des données issues d'observations par l'aviation (68.000 observations dans le cas présenté ici 15/12/2011 à 00 UTC)



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 ...

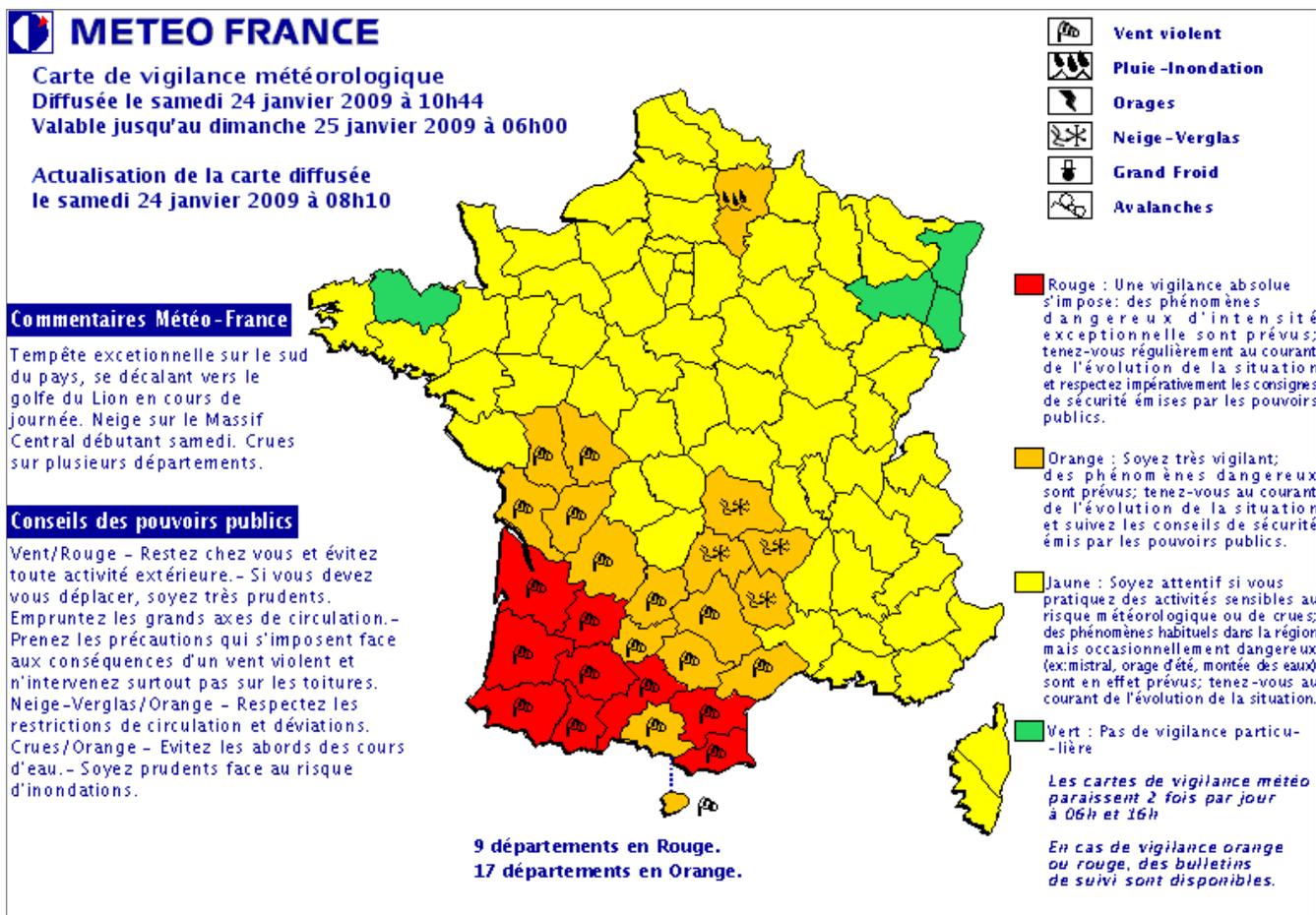




La vigilance météorologique

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

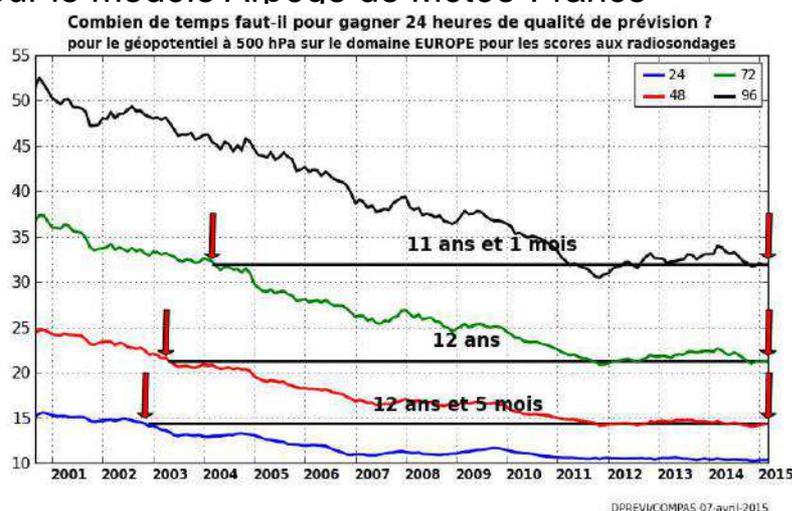
Une carte de France est actualisée au moins 2 fois par jour (à 6h et 16h), qui signale au moyen d'un code couleur, département par département, les menaces dans les 24h à venir



Carte vigilance (tempête) émise par Météo-France le 24 janvier 2009 à 10h44. A droite, l'explication du code couleur et des différents pictogrammes relatifs aux phénomènes dangereux.

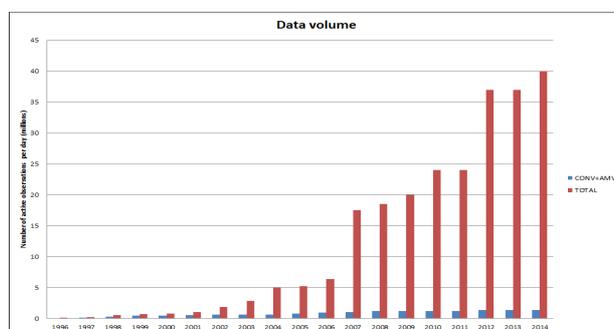
Les progrès récents de la prévision du temps

Les progrès des modèles de prévision sont évalués par des scores statistiques. Pour les modèles globaux on utilise souvent l'erreur quadratique moyenne évaluée sur l'ensemble de l'hémisphère nord, ou encore sur l'Europe, comme dans la figure pour le modèle Arpège de Météo-France



L'erreur est ici évaluée mois par mois sur 2000-2015, avec un lissage sur 12 mois pour filtrer les variations saisonnières, pour le géopotential qui, comme la pression, caractérise bien les performances d'un modèle à grande échelle. En comparant la prévision à 96h d'échéance (noir) avec celle à 72h (vert), à 48h (rouge) et à 24h(bleu), on estime le temps qu'il a fallu pour « gagner 24h de prévision » en qualité : 11 à 12 ans. **Sur les 30 à 40 dernières années, on estime que l'on a gagné environ 1 jour de prévision par décennie**

Les progrès sont largement liés à l'augmentation de la puissance des calculateurs qui a permis de représenter plus de phénomènes, à des échelles plus fines, et aussi d'utiliser en temps réel de plus en plus d'observations, surtout satellitaires

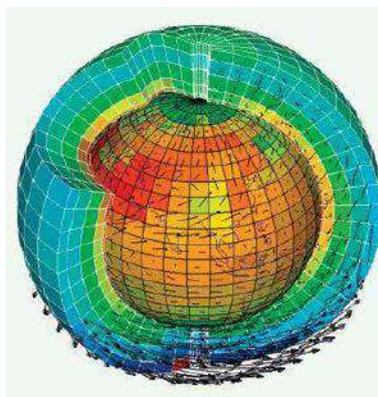


Evolution du nombre de données observées utilisées dans le modèle du CEPMMT, depuis 1996 : observations satellitaires en rouge, conventionnelles en bleu



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.

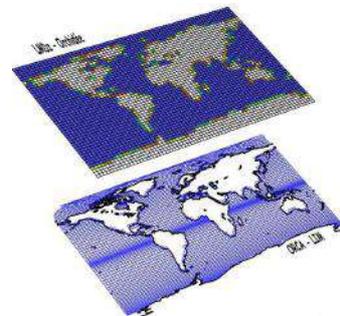


DECOUPAGE DU GLOBE PAR PROCESSEUR



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.





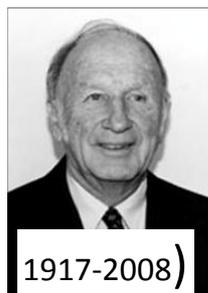
Effet papillon et météorologie

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.*



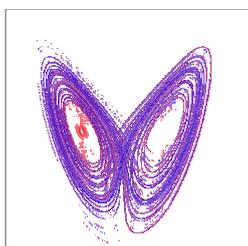
1749-1827



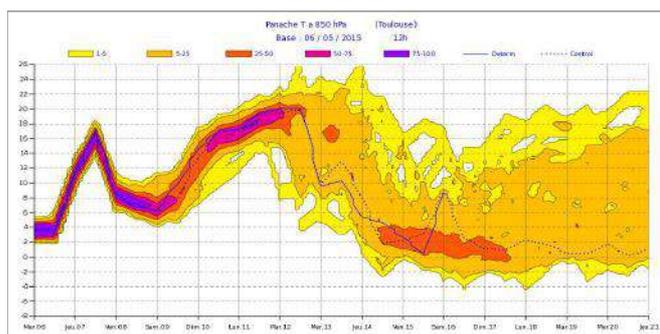
1917-2008)

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?



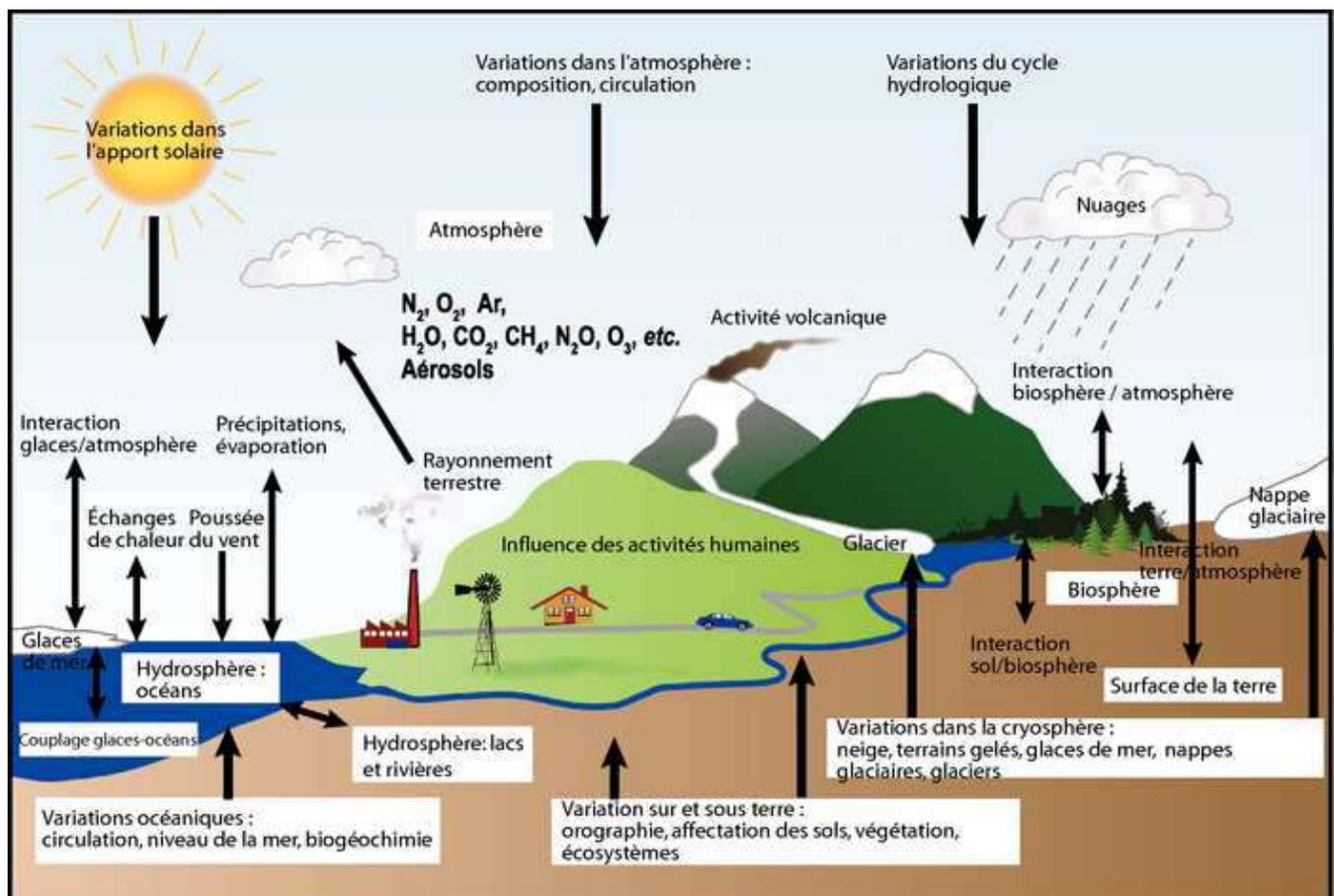
En simplifiant de manière très importante les équations qui décrivent le mouvement de l'atmosphère, Lorenz a trouvé que ce système simplifié est déjà sujet à cette forme de chaos, c'est l'**attracteur de Lorenz** et le **chaos déterministe**



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).

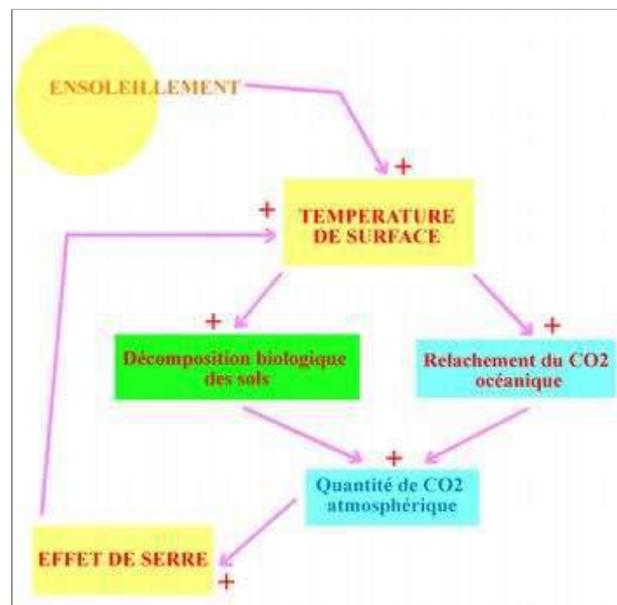
Les rétroactions, clés de la sensibilité climatique

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 plus ou moins importantes:

- la rétroaction de la vapeur d'eau. Le signe et l'amplitude sont encore sujets de discussion;
- 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).

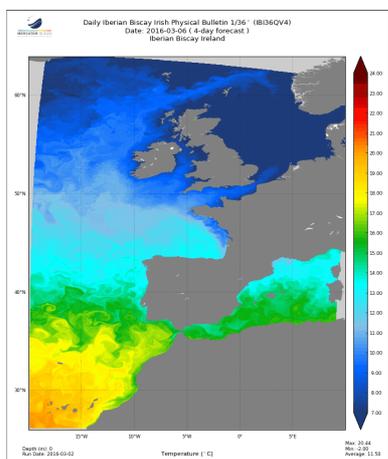
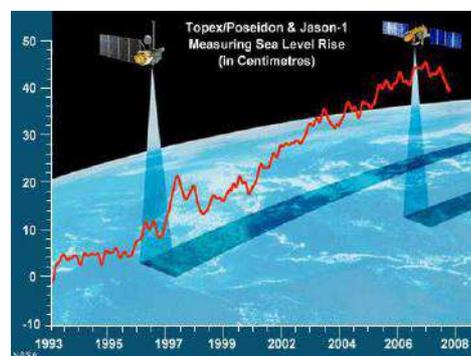
Pour modéliser l'océan, on doit en connaître la température, la salinité et le courant sur toute sa profondeur, ainsi que le niveau de sa surface (hauteur dynamique). On doit aussi prendre en compte des éléments de chimie océanique pour bien comprendre le rôle du plancton dans le cycle du carbone.

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.



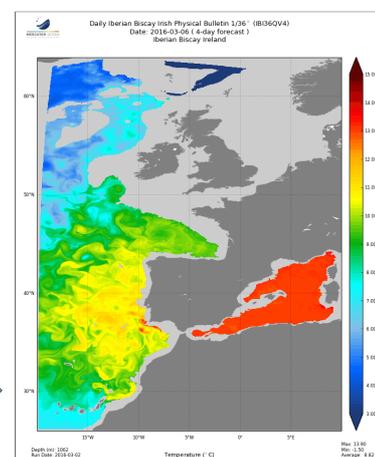
Flotteur profileur ARVOR (IFREMER)



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>).

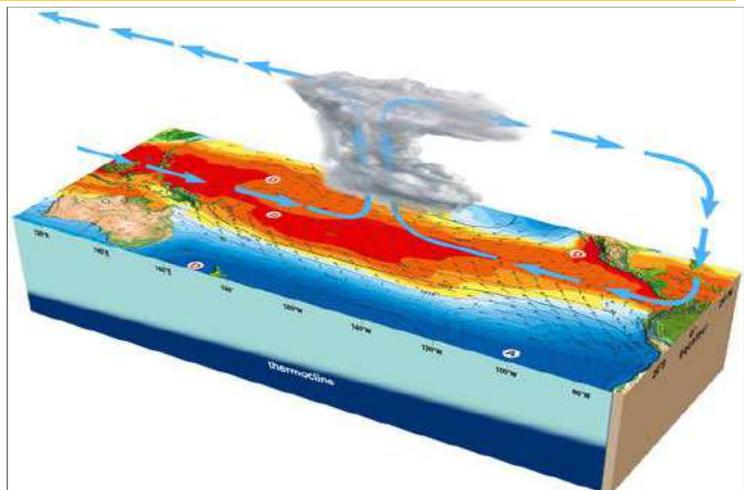
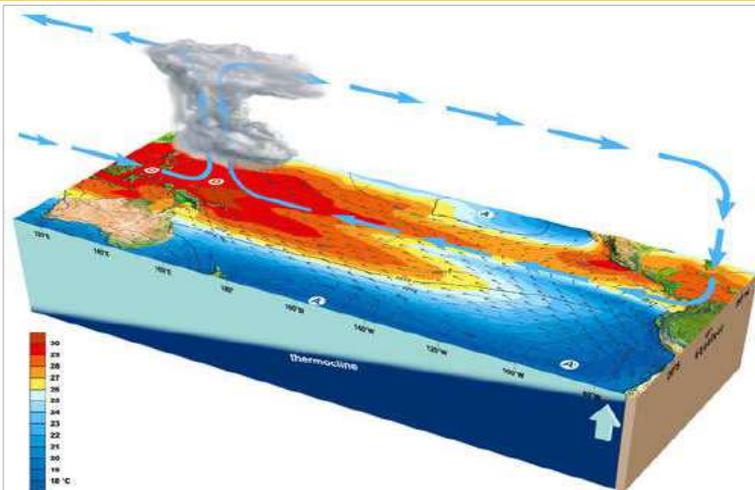
Prévision de la température de la mer à 4 jours d'échéance:

← en surface à 1000m de profondeur →

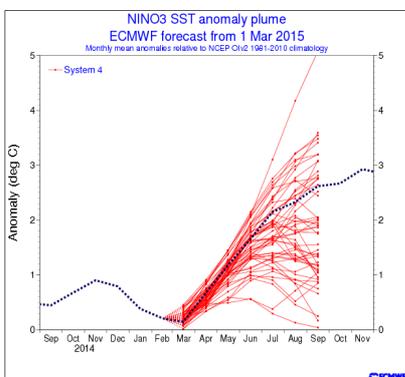


Le phénomène El Niño

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.



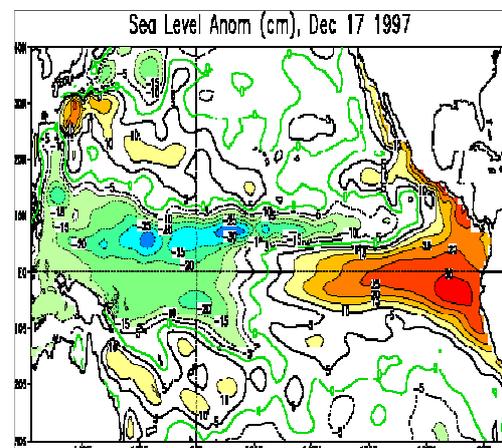
*Vent et température océanique sur le Pacifique équatorial :
situation moyenne à gauche et situation El Niño à droite.*



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,

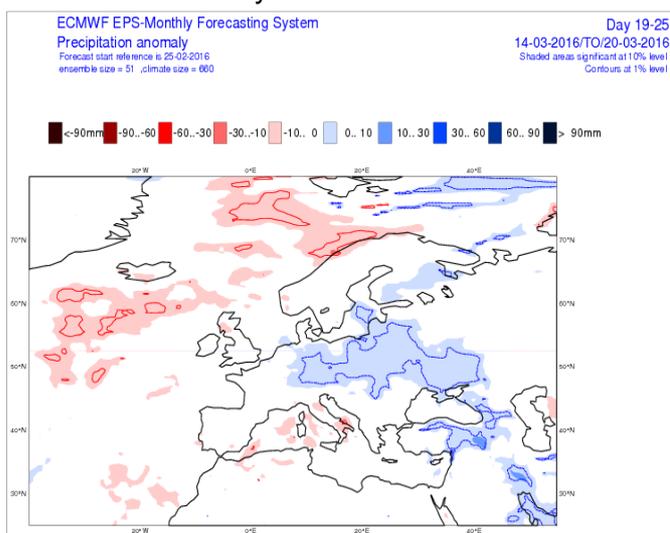


El Niño 1997
Anomalie de hauteur de l'océan



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.

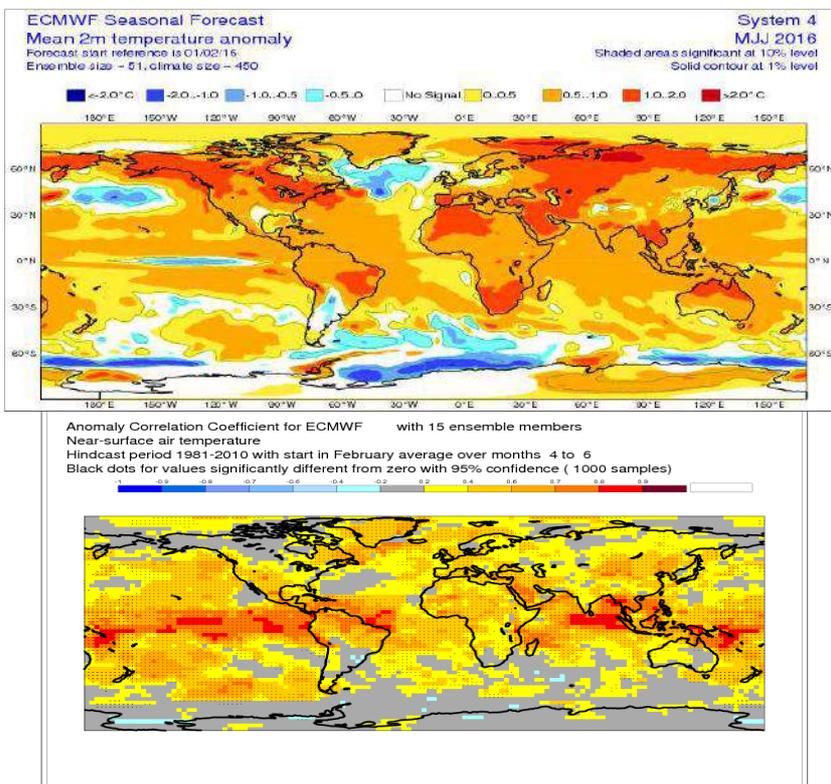


Au Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT), la prévision mensuelle est exécutée deux fois par semaine. Un ensemble de modèles produit plusieurs dizaines de prévisions numériques tenant compte des diverses sources d'incertitude. La carte ci-dessus illustre les anomalies de précipitation 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 le bulletin de prévision mensuelle de Météo-France : <http://www.meteofrance.com/accueil/previsions-mensuelles>

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 : <http://www.meteofrance.com/accueil/previsions-saisonnières>



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



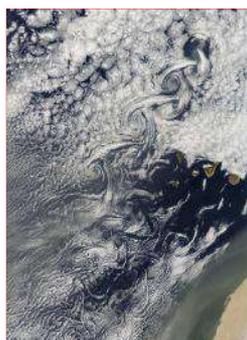
Guy S. Callendar : Constate en **1938** une augmentation de 10% du CO_2 , qui semble très excessive à ses contemporains

L'apport des satellites au suivi du changement climatique

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

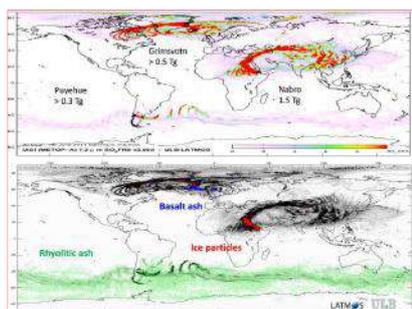
- connaissance et compréhension des distributions spatiales de la nébulosité;
- étendue et suivi temporel des feux, des panaches de sable ou de cendres volcaniques
- suivi des principales variables climatiques
- étude et modélisation des processus

Formation de vortex autour des Canaries

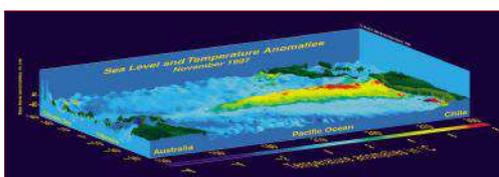


Les principales variables climatiques (en anglais ECV pour "Essential Climate Variables") sont des variables étroitement liées au climat, et relativement faciles à mesurer, dont des collections homogènes à long terme permettent de surveiller les tendances climatiques globales. Une cinquantaine ont été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

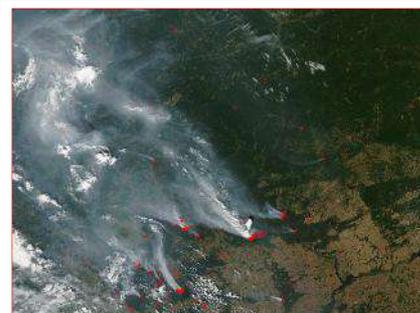
- Atmosphère: nuages, gaz à effets de serre, ozone, aérosols, vapeur d'eau,...
- Océans: température, niveau des mers, couleur de l'eau, banquises ...)
- Surfaces continentales: végétation, feux, calottes polaires, glaciers, ...)



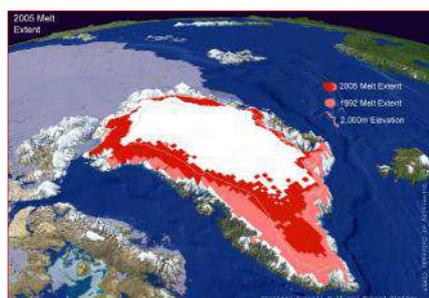
Cendres volcaniques issues de diverses éruptions



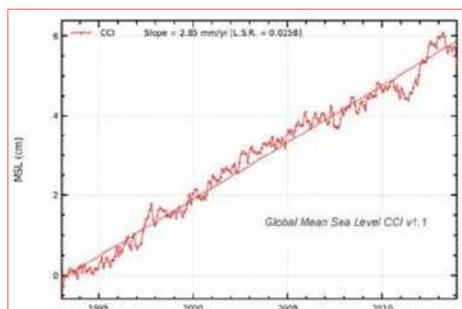
Anomalie de température et du niveau de la mer lors de l'épisode El Niño de 1997



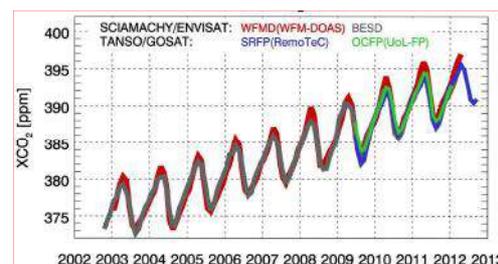
Pyroconvection lors des feux en Russie en 2010



Fonte du Groenland selon les données des satellites DMSP



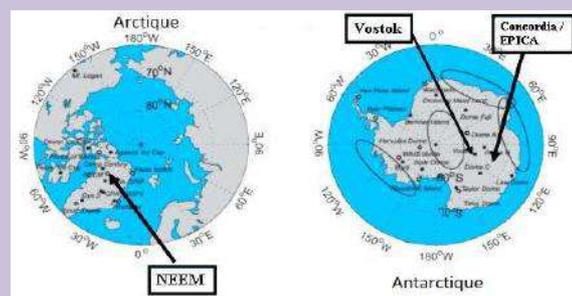
Augmentation du niveau de la mer à l'échelle globale depuis 1983 d'après les données des altimètres spatiaux



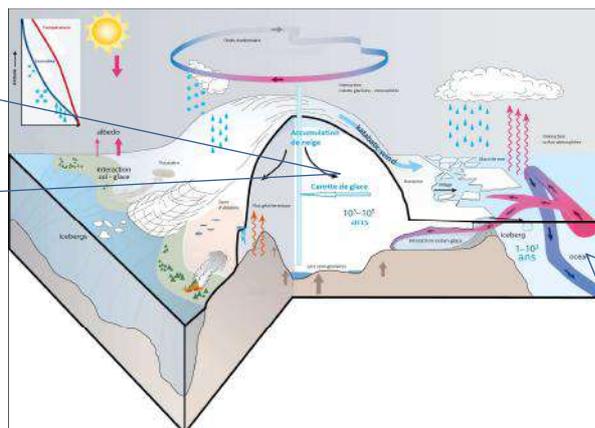
Augmentation de la concentration du dioxyde carbone dans l'hémisphère Nord selon les données satellitaires

Les régions polaires et le climat

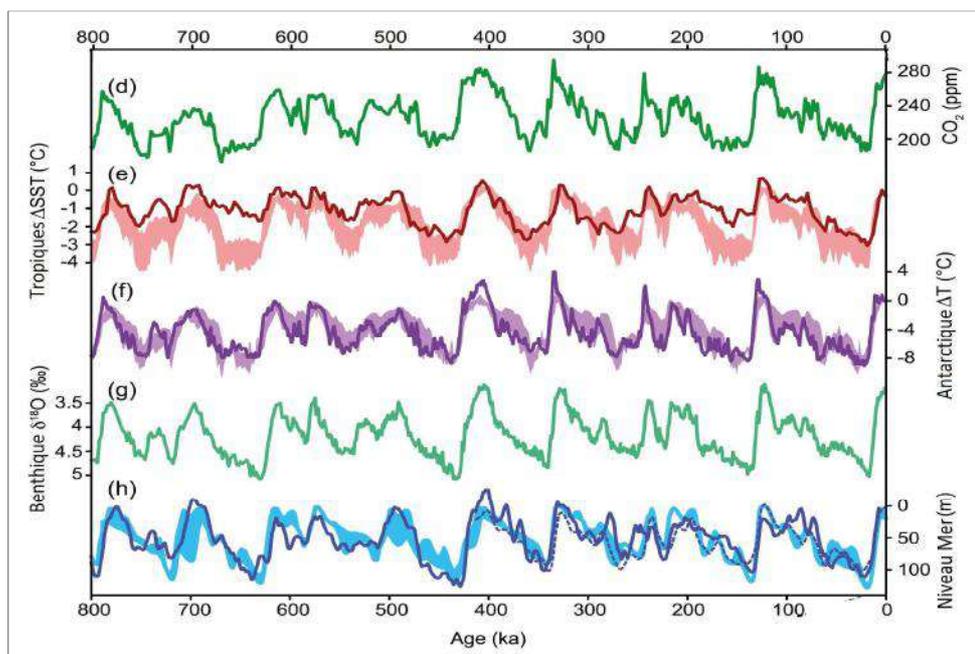
Les calottes glaciaires, principalement Groenland et Antarctique, interagissent fortement avec le climat, à des échelles de temps qui vont du mois au million d'années.



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

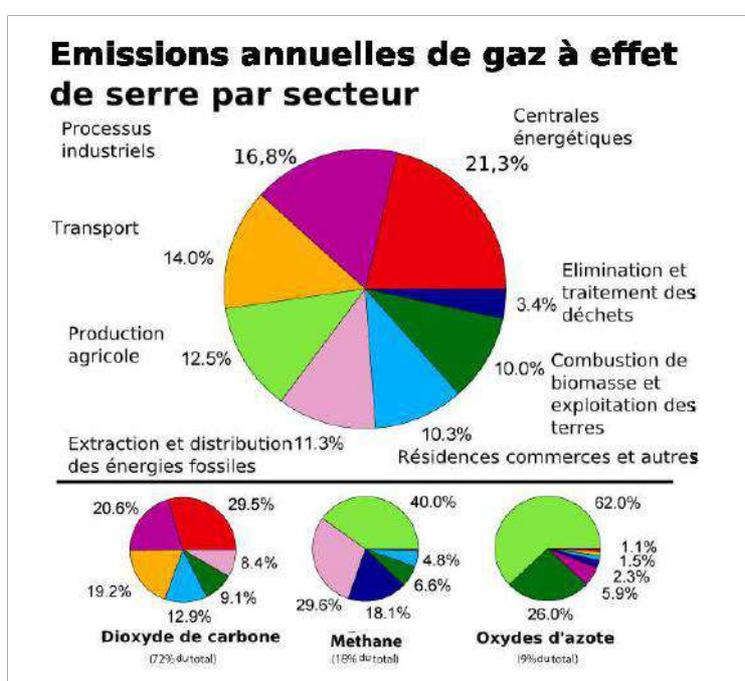


Les eaux froides Antarctiques plongent et sont remplacées en surface par des eaux plus chaudes, qui transportent de la chaleur depuis les tropiques (40% du transport total)



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 (CO_2 ...). 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



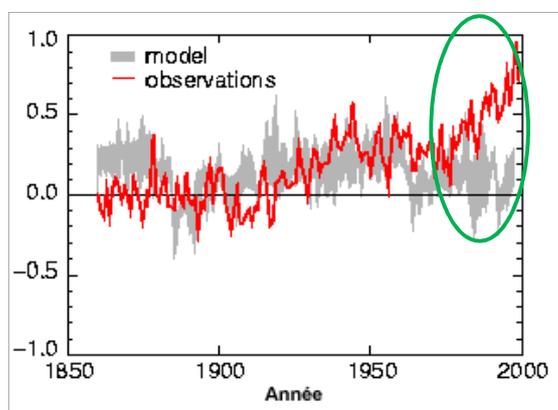
Origine anthropique des gaz à effet de serre

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	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

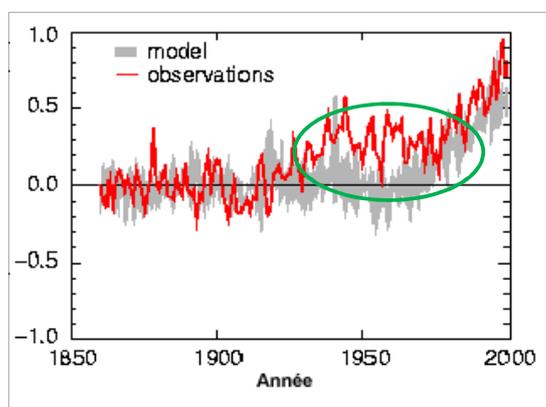


Les causes du réchauffement actuellement observé



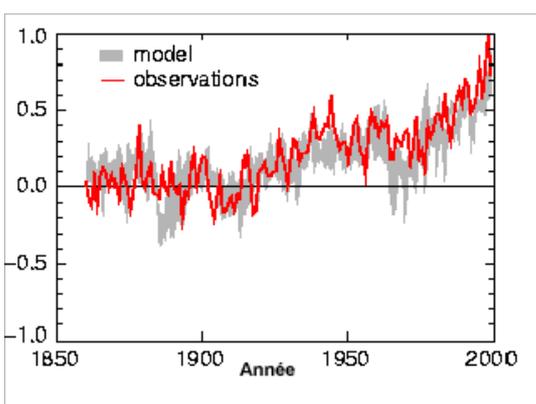
Les causes naturelles seules

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 ...)

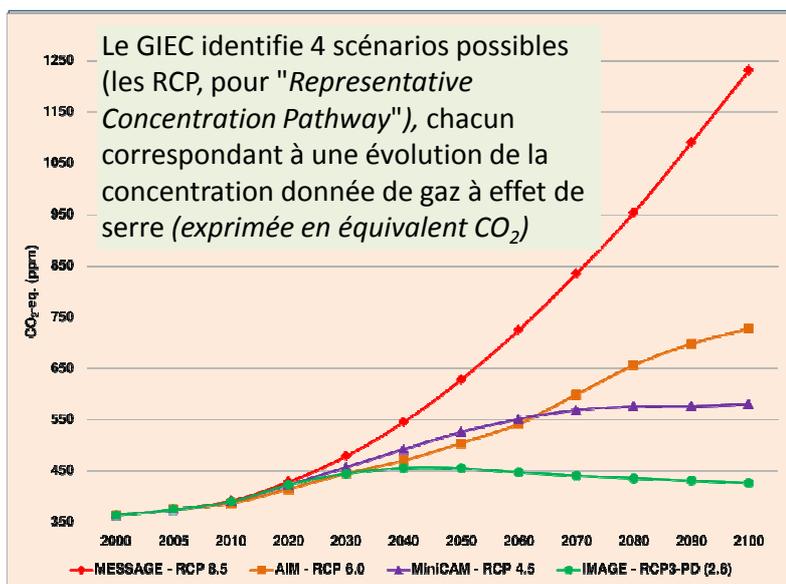


L'ensemble de tous les effets

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.**

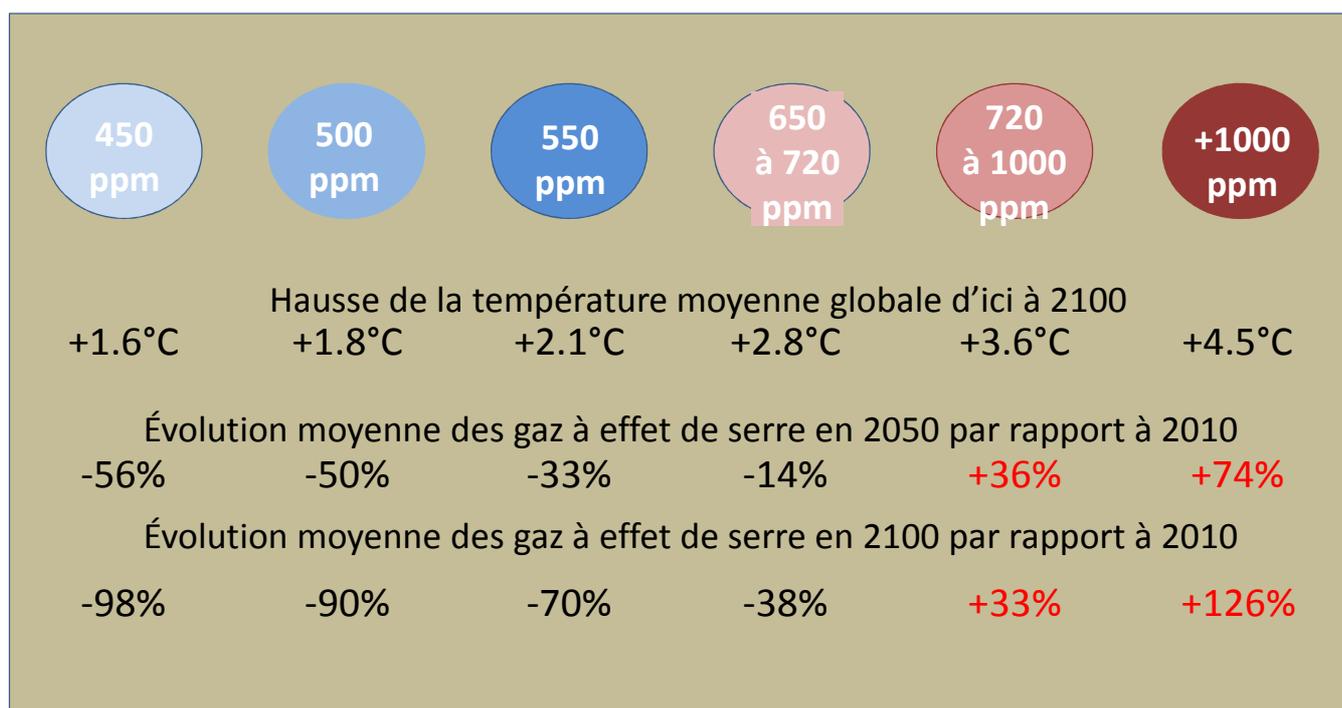


Le climat à la fin du XXI^{ème} siècle



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

Différences de températures
à la fin du XXI^{ème} siècle par rapport
à la fin du XX^{ème} siècle

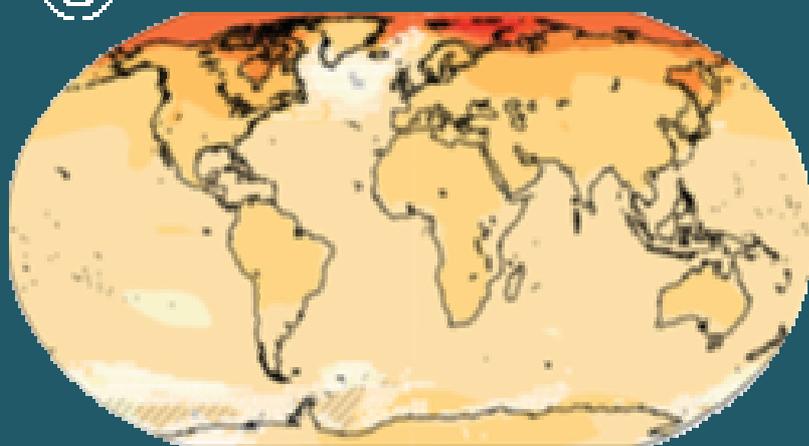
+0°C



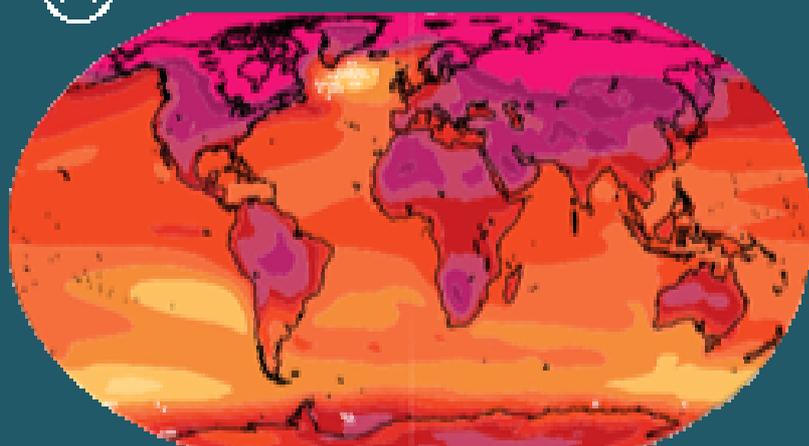
+6°C



RCP2.6 2081-2100



RCP8.5 2081-2100

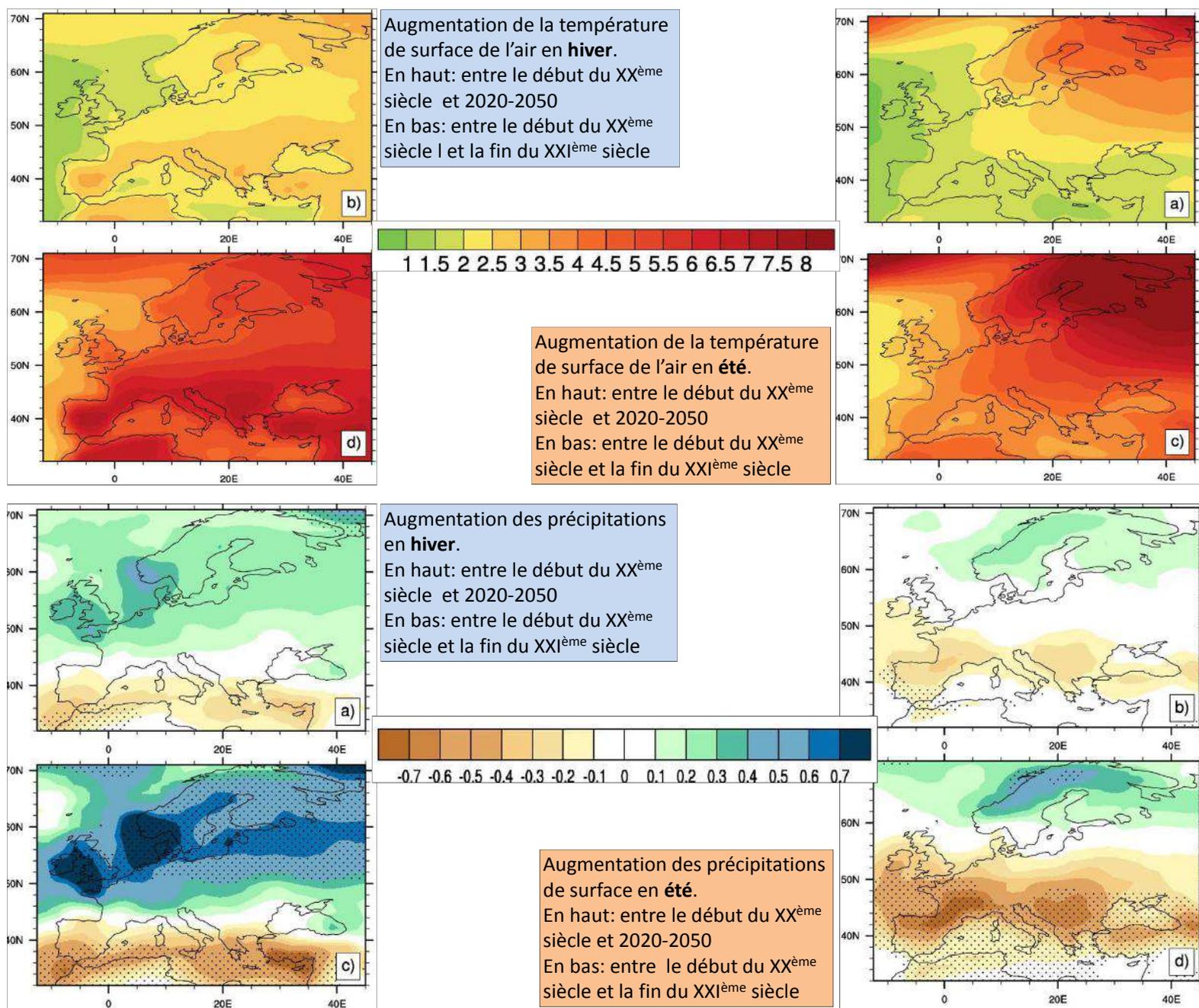


Scénario modéré:
Concentration des gaz
à effet de serre
(en équivalent CO₂)
inférieure à 450 ppm

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 ?

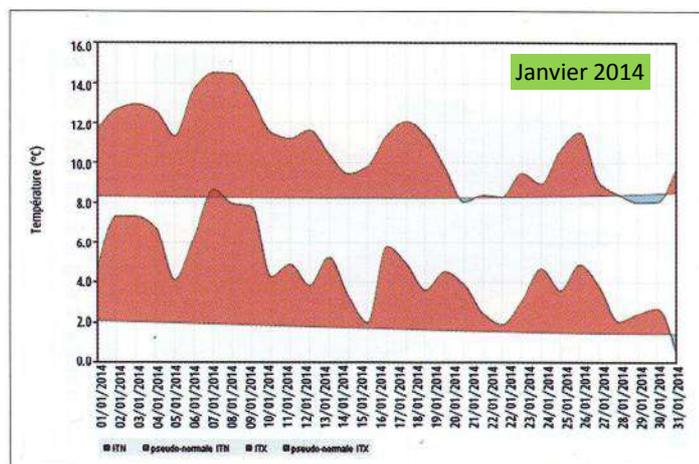
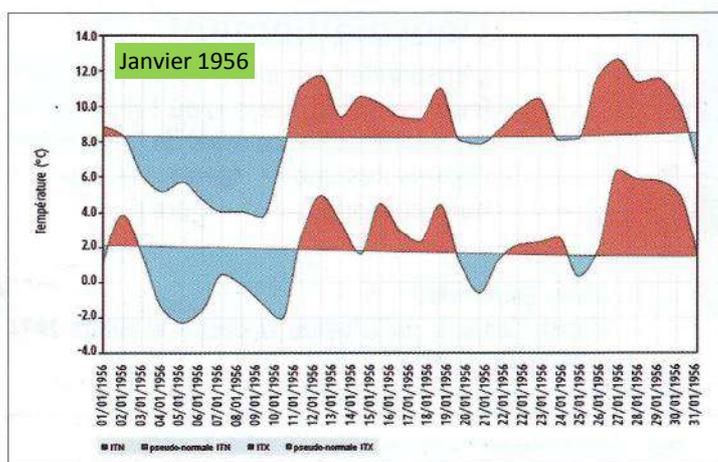


Résultats établis à partir de simulations issues d'un large ensemble de modèles climatiques différents, ayant tous participé aux évaluations du GIEC. Cas du scénario RCP8.5, pour lequel la concentration en équivalent CO₂ dépasse 1000 ppm à la fin du XXI^{ème} siècle



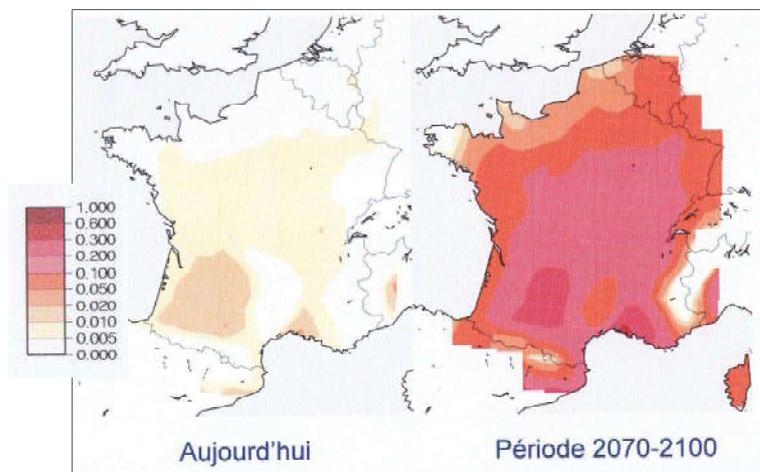
Quels événements climatiques extrêmes attendus en France vers la fin du siècle?

Des signes avant-coureurs ?



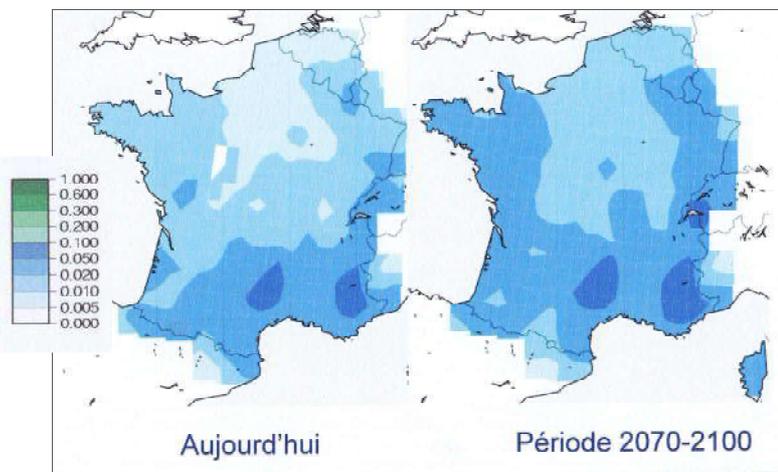
Ecarts à la normale des températures maximales et minimales pour les mois de janvier 1956 et 2014

Évolution probable



Probabilité de températures $\geq 35^{\circ}\text{C}$

Des canicules estivales plus fréquentes



Probabilité de précipitations $\geq 20\text{mm/jour}$

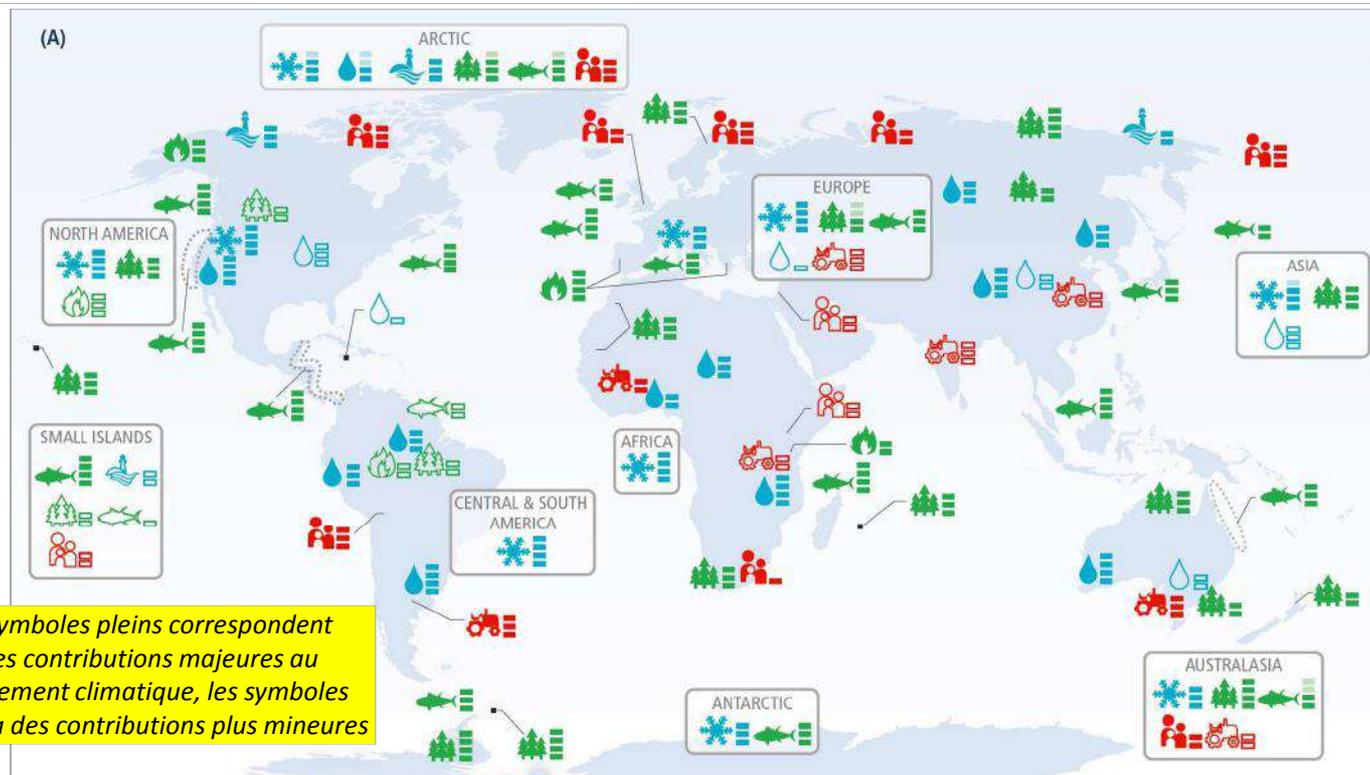
Hausse probable des fortes pluies hivernales

Les impacts du changement climatique

Le changement climatique annoncé pour le XXI^{ème} siècle modifiera les conditions environnementales (ressources en eau, glaciers et manteau neigeux, niveau de la mer, environnement côtier ...) et aura donc de nombreuses conséquences pour l'habitabilité de la planète tant pour la vie végétale et animale (écosystèmes terrestres et marins, feux de forêt ...) que pour l'homme (production alimentaire, santé ...). De nombreuses autres activités économiques seront aussi affectées par ces changements.

Les principaux impacts du changement climatique

Sur cette carte le nombre de tirets superposés à la droite de chaque symbole indique la confiance que l'on peut attribuer à ces changements, de très basse (1 tiret) à basse (2 tirets), moyenne (3 tirets), grande (4 tirets) et très grande (5 tirets)



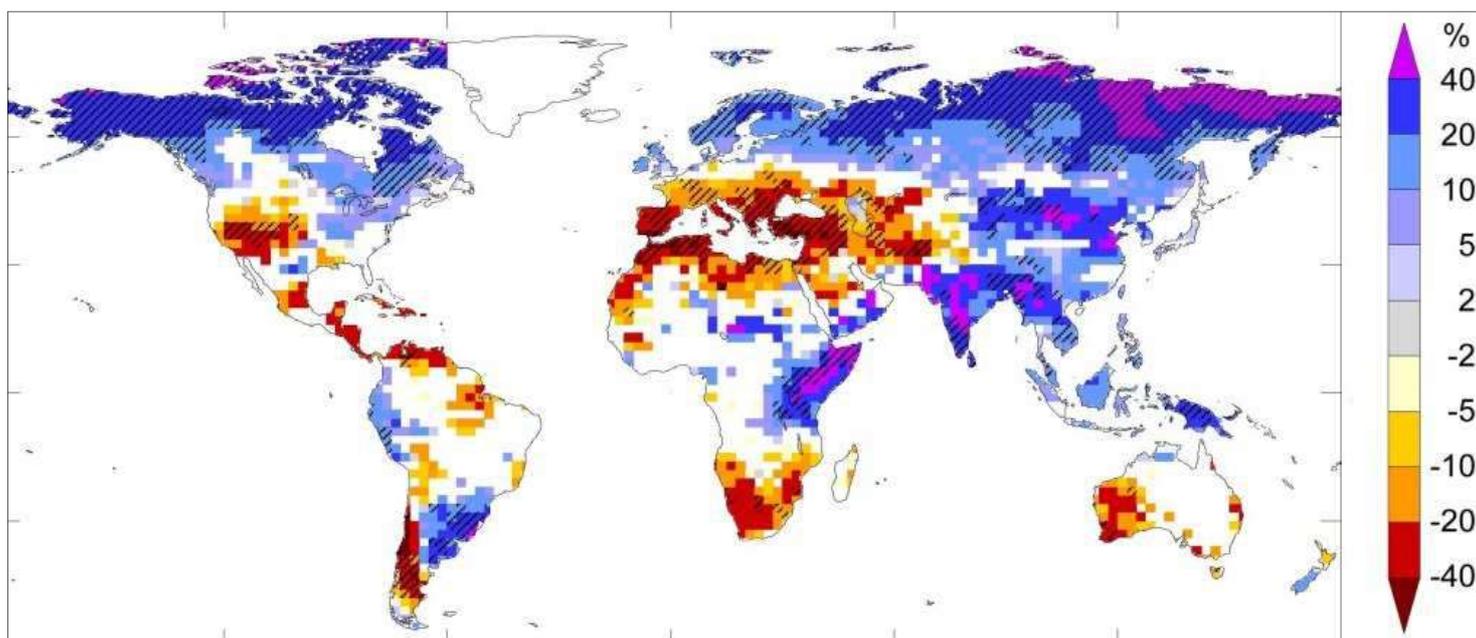
	Neige et glaciers, pergélisols
	Rivières et lacs, inondations et sécheresses
	Erosion côtière, montée du niveau de la mer

	Ecosystèmes terrestres
	Feux naturels
	Ecosystèmes marins

	Production alimentaire
	Habitabilité, santé, économie

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.



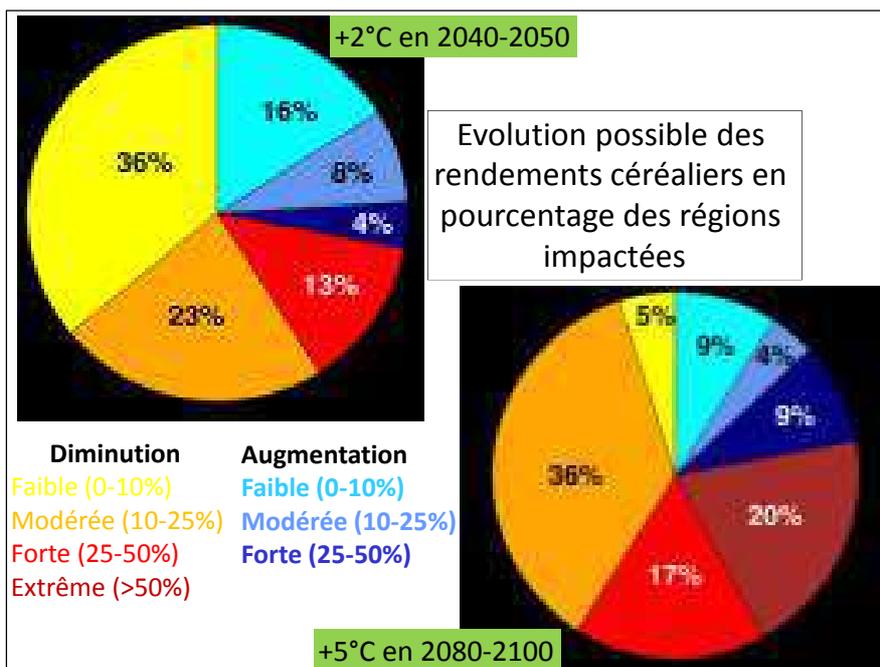
Carte des changements de ruissellement (exprimés en %) pour un réchauffement global de l'ordre de 3 °C

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).



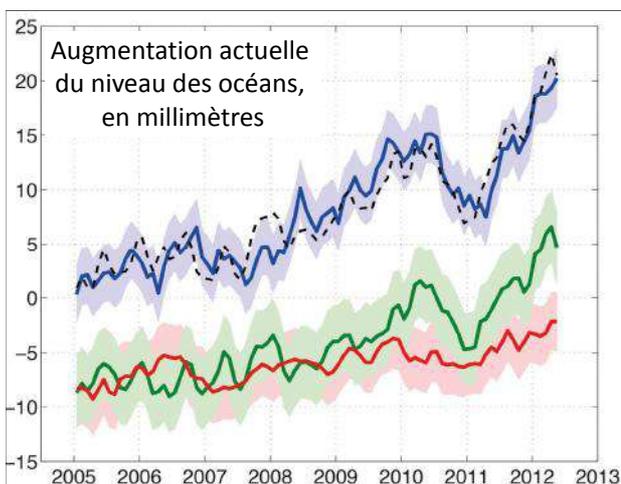
Une hausse de 2°C (en 2040-2050 dans le scénario du "laisser-faire") s'accompagnerait d'une baisse de rendement pour 72% des régions, alors que seules 28% connaîtraient une amélioration (en haut à gauche). Une hausse d'environ 5 °C à la fin de ce siècle (en bas à droite) engendrerait des risques considérables 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

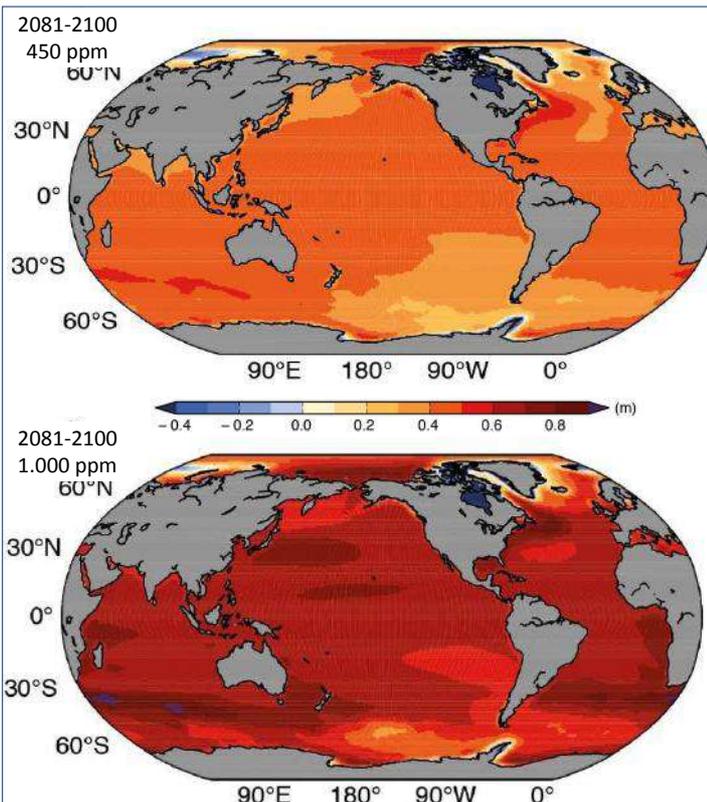
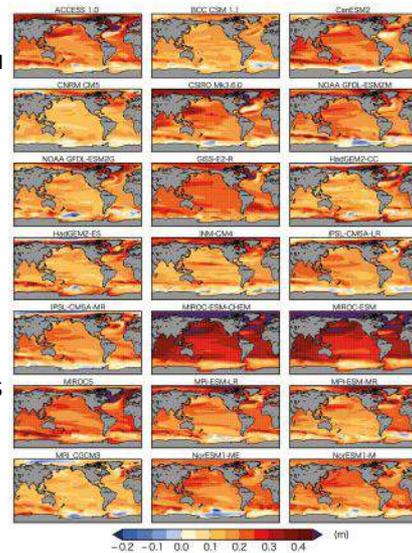
Le changement climatique et le niveau de la mer



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)

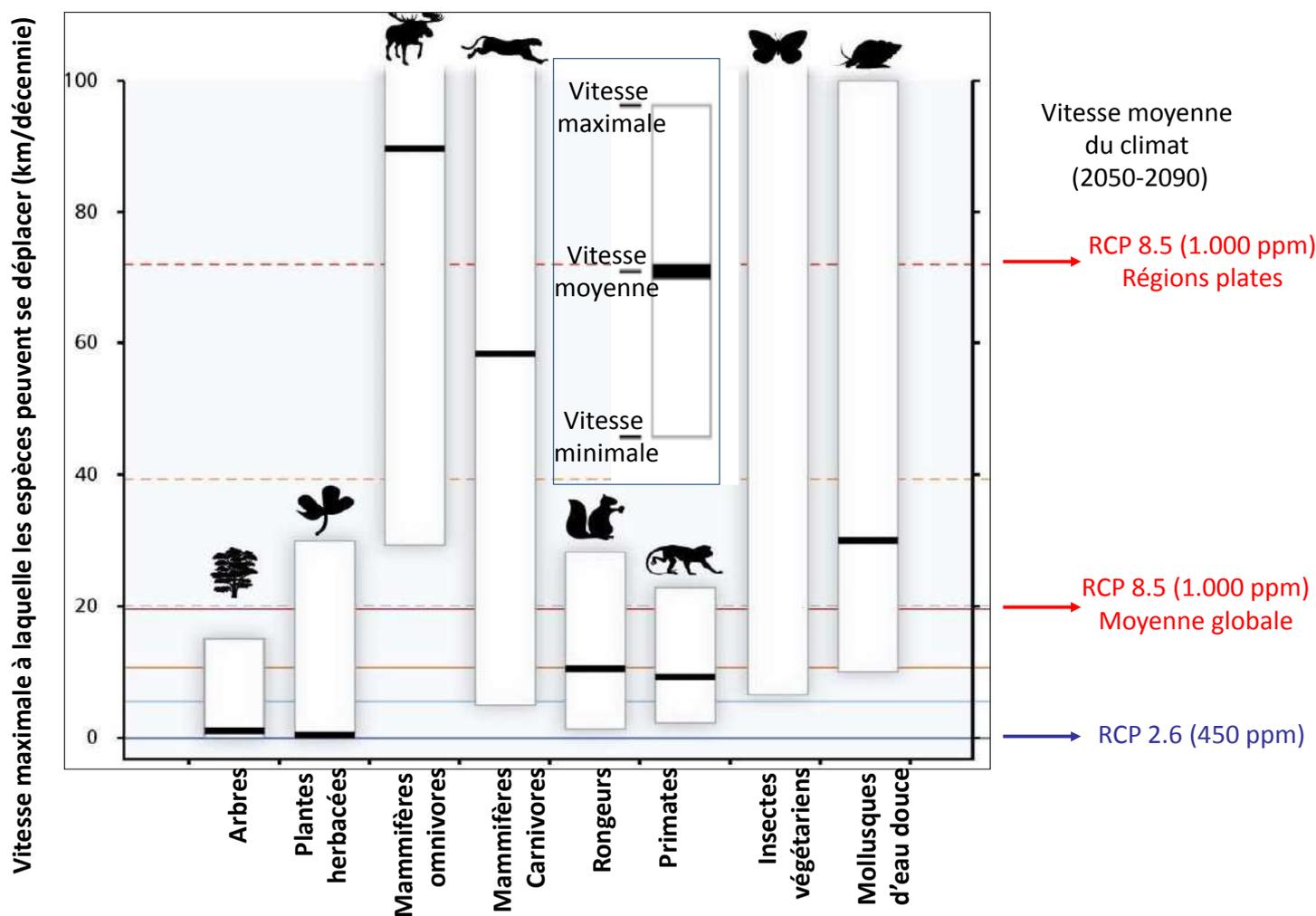


Ces résultats sont la moyenne de 21 modèles différents



Le changement climatique, la faune et la flore

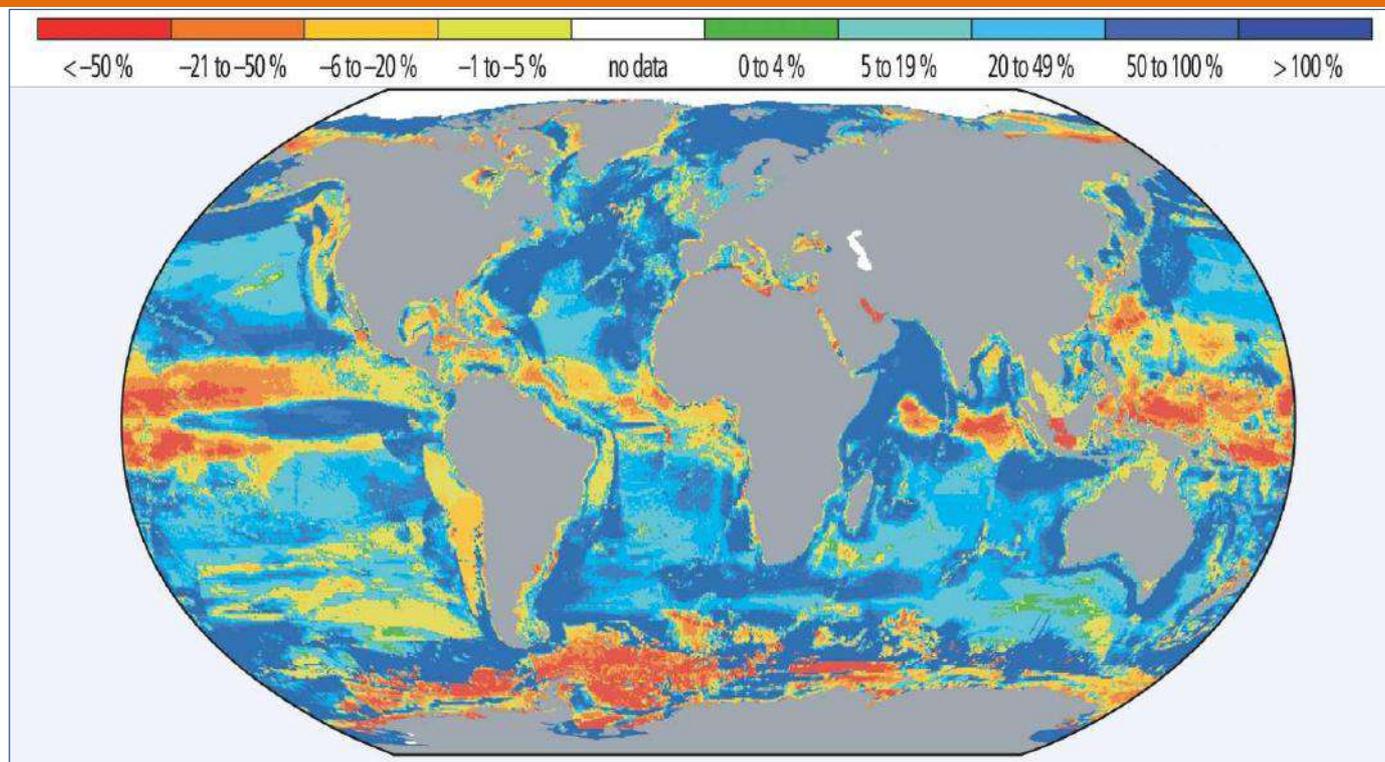
Un des problèmes principaux est d'apprécier si les êtres vivants, faune et flore, vont être capables de s'adapter au changement climatique. Il faut, à cet égard, apprécier non seulement si les nouvelles conditions seront compatibles avec la survie de ces espèces, mais aussi si celles-ci seront capables 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.

Il a produit cinq rapports depuis sa création: 1990 (avec un supplément en 1992), 1995, 2001, 2007, et le 5^{ème} et plus récent en 2013-2014.



Le GIEC est organisé en 3 groupes de travail (WG), qui chacun élabore une partie du rapport global:
 WG1 - les éléments 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

Les auteurs du 5^{ème} rapport: 830 au total, originaires de 85 pays, dont 301 (36%) venant de pays en développement, et 179 femmes (21%). Parmi eux 529 (63%) n'avaient pas été impliqués dans les rapports précédents

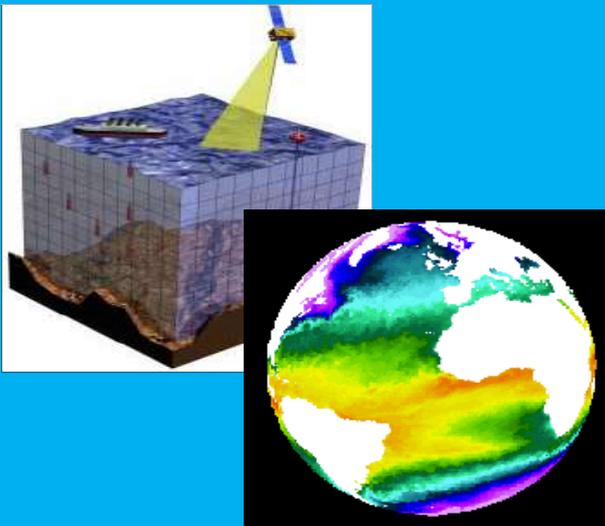
Une phrase clef du rapport 2013:

Il est *extrêmement probable* que l'influence de l'homme est la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX^{ème} siècle.

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.

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.