

Modélisation du climat

- design des modèles, différences avec modèles météo
- types de simulations, le GIEC
- attribution, critique des modèles
- prévision saisonnière
- services climatiques
- réanalyse

Modèles de climat

Modèles météorologiques: représenter le système tel qu'il est. Echelles fines, courtes durées (1h-1mois)

Modèles de climat: reproduire le comportement moyen du système, sa variabilité (ex: fréquence d'évènements extrêmes), son évolution dans la durée (10ans-100ans)

- Modèles de climat, de "système Terre"
- Applications, Scénarios du GIEC
- Services climatiques, modélisation 'sans couture'

Modèles de climat

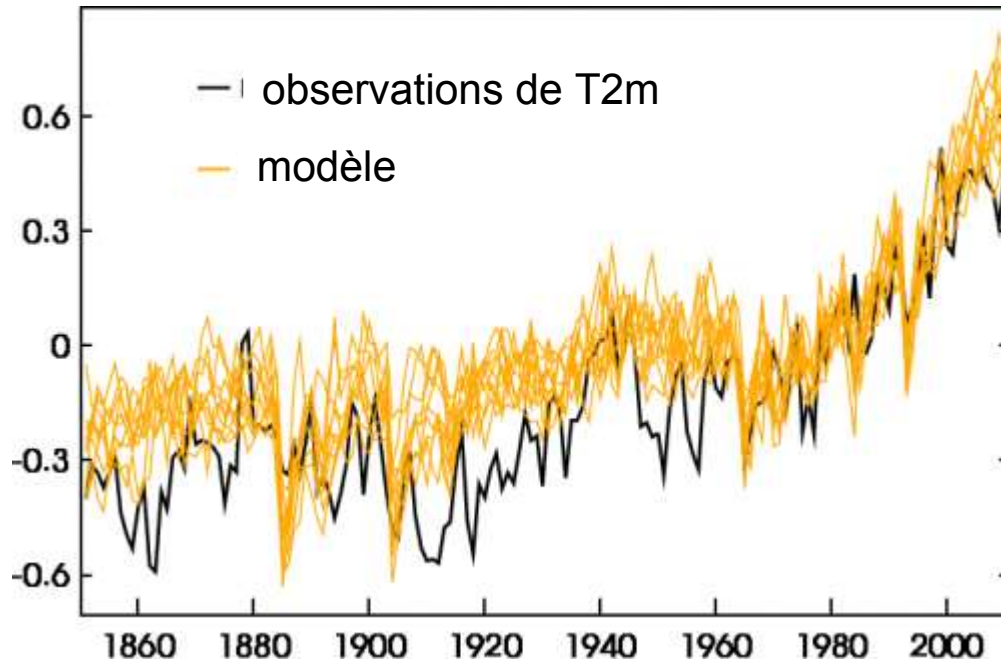
différences avec modèles météo:

- durées de simulation plus longues (1-1000ans)
- résolution plus faible:
 - ~30km global (GCM: general circulation model)
 - ~5km régional (RCM: regional climate model)
- importance des **variables à évolution lente**:
 - température/humidité du sol profond, végétation
 - dynamique des océans, banquise
 - GES gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, O₃) et aérosols (sulfates)
- forçages externes:
 - scénarios d'émissions humaines
 - activité solaire
 - volcans

Une simulation climatique

avec le GCM Arpege-climat:

écarts à la T moyenne sur le globe
1850-2010



- les variations au jour le jour sont imprévisibles
- les variations lentes le sont

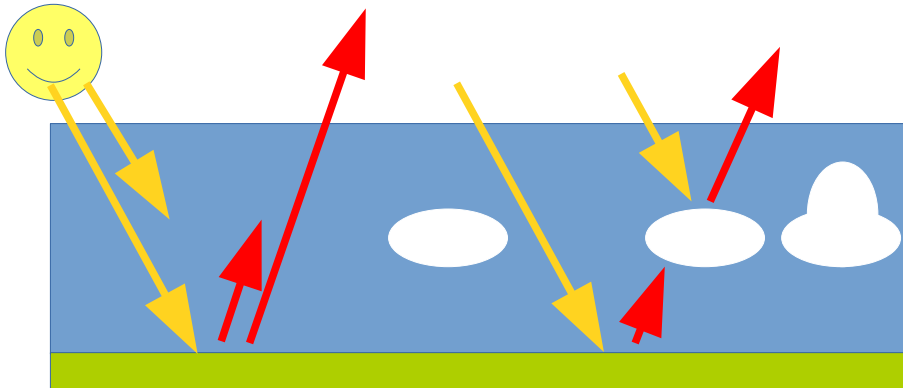
'climat' = statistiques sur ~30ans:

- moyennes
- tendances
- extrêmes
- cycles: diurne et saisonnier
- oscillations: ENSO, NAO...

Comprendre l'effet de serre

2 effets du rayonnement sur le climat: (schématiquement)

- réchauffement par effet de serre:
 - le soleil rayonne dans l'électromagnétique visible
 - la Terre rayonne vers l'espace surtout dans l'IR
 - l'énergie est interceptée par les sols, le nuages, les GES
(gaz à effet de serre: H₂O CO₂ CH₄...)
- refroidissement par aérosols:
 - interception du rayonnement solaire
 - réchauffement local, refroidissement en-dessous
 - surtout vrai des aérosols sulfatés (ex: volcans)



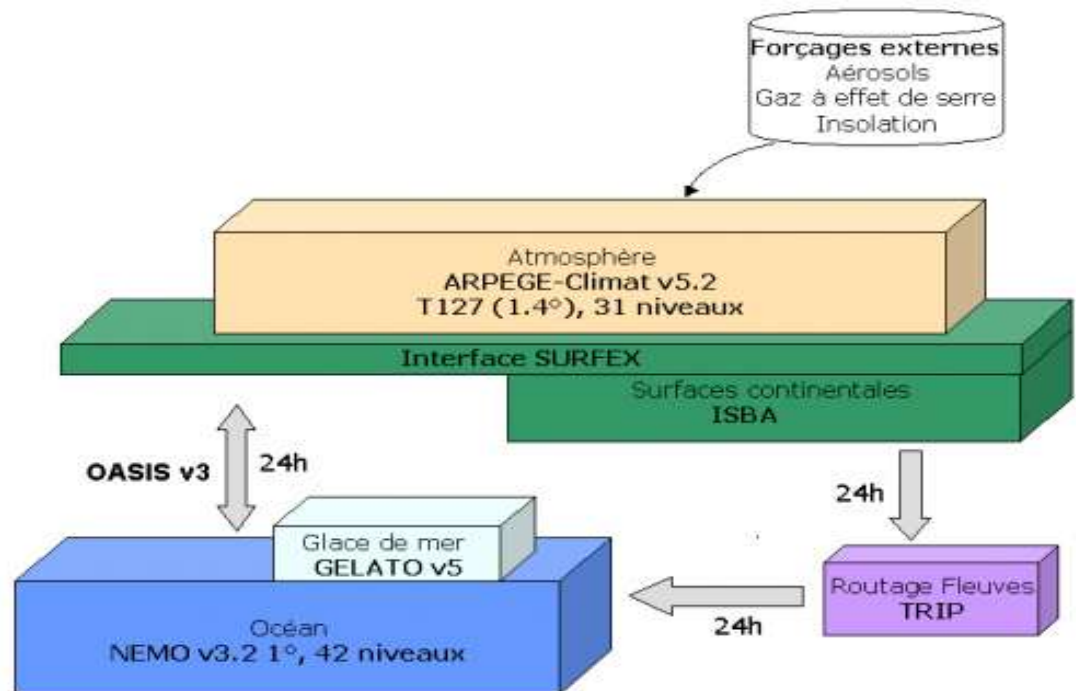
Modèles de climat: couplages interactifs

Aux échelles climatiques, les **rétroactions** deviennent importantes: on ne peut plus séparer les échelles de temps des systèmes

- **atmosphère** météorologique
- **océan** couplé 3D avec banquise interactive, hydrologie
- flux sur **sol/végétation**, avec végétation évolutive
- **chimie/aérosols**

Compromis entre sophistication de l'ensemble, et maîtrise de sa qualité

ex: modèle de 'système Terre'
de Météo-France



Modèles de climat: validations

Comment se convaincre qu'un climat simulé sera notre climat futur ?

Tests nécessaires: comparaison avec obs, et entre modèles

- reproduire le climat actuel
- être stable sur plusieurs siècles (diagnostics de dérives)
- reproduire les évolutions récentes
- runs paléoclimatiques (glaciations quaternaires, gaz connus par les carottes glaciaires)

Expériences typiques:

- simuler un autre climat stable (ex: doublement CO₂)
- simuler une évolution prescrite. ex. de scénarios:
 - croissance maîtrisée ou non des GES
 - croissance, puis décroissance
 - géoingénierie

La dispersion entre modèles est supposée renseigner sur les incertitudes des simulations

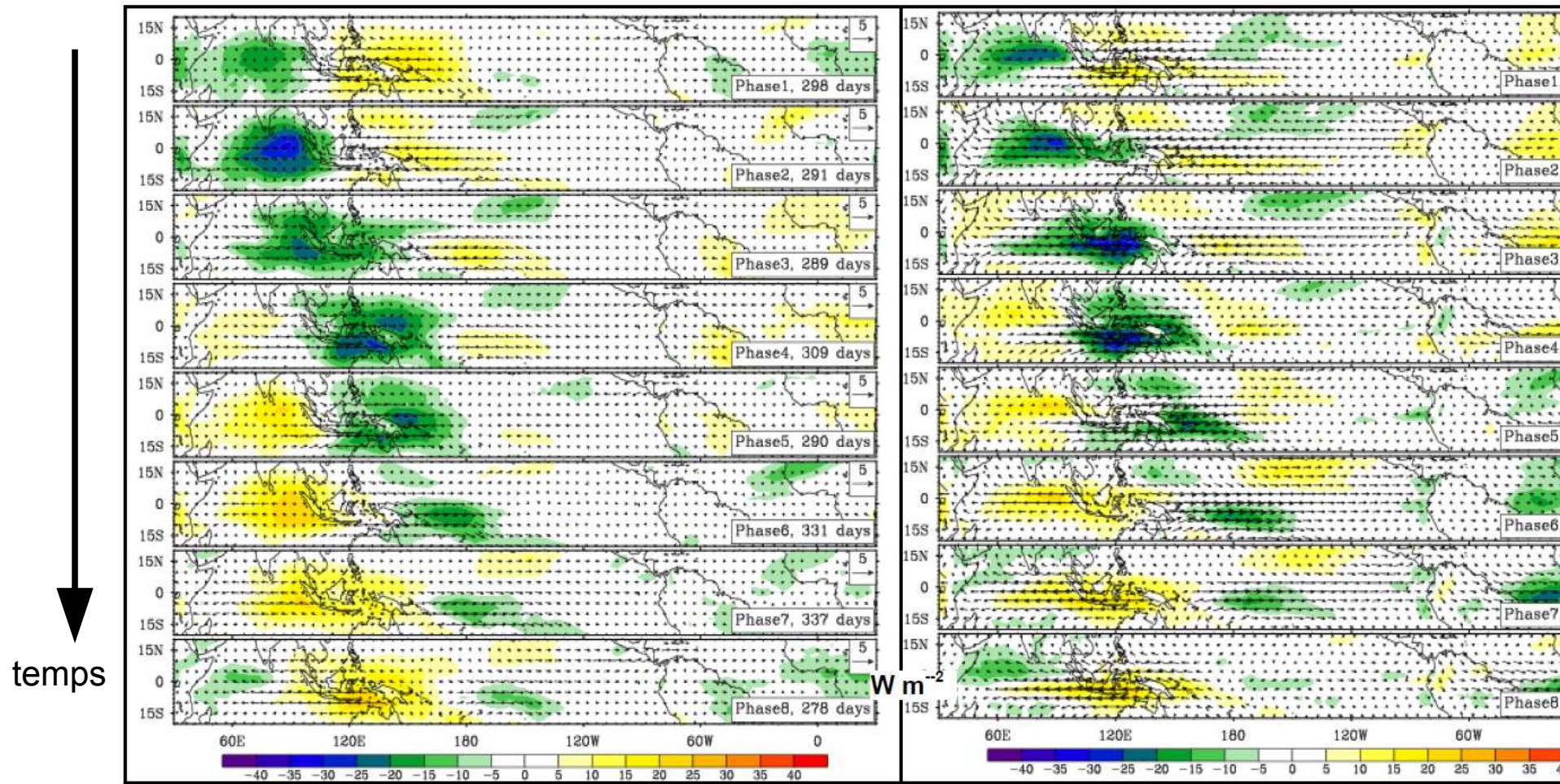
Validation des modèles de climat

Evaluation du mode principal de variabilité de météo sous les tropiques (oscillation de Madden-Julian, cycle de 30 à 40 jours)

Variations de flux IR au sommet de l'atmosphère

– observation

simulation



Le GIEC et le changement climatique

Peut-on prévoir le futur climat et ses conséquences ?

- coordonné par le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) de l'ONU
- **rapports de synthèse** réguliers (AR = assessment reports). AR6 publié en 2023

3 chapitres :

1) bases physiques (obs & simulations climatiques):

- origine humaine
- modification de la météo, océan, banquise, etc
- attribution des événements extrêmes

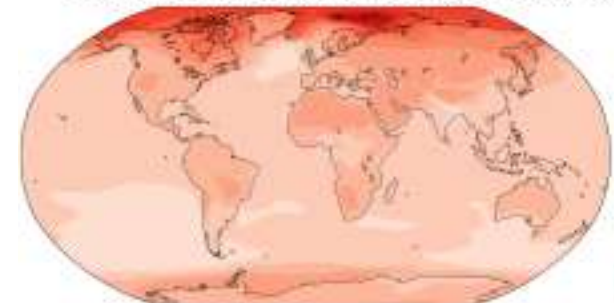
2) impacts, adaptation, vulnérabilités

3) atténuation (mitigation) du changement climatique

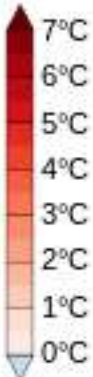
pour en savoir plus:

- lire les rapports, médias (ex confs Jancovici)
- pb qui dépasse la météo
- **s'intéresser aux conflits d'intérêts !**

Distribution d'un réchauffement moyen de 1,5 °C

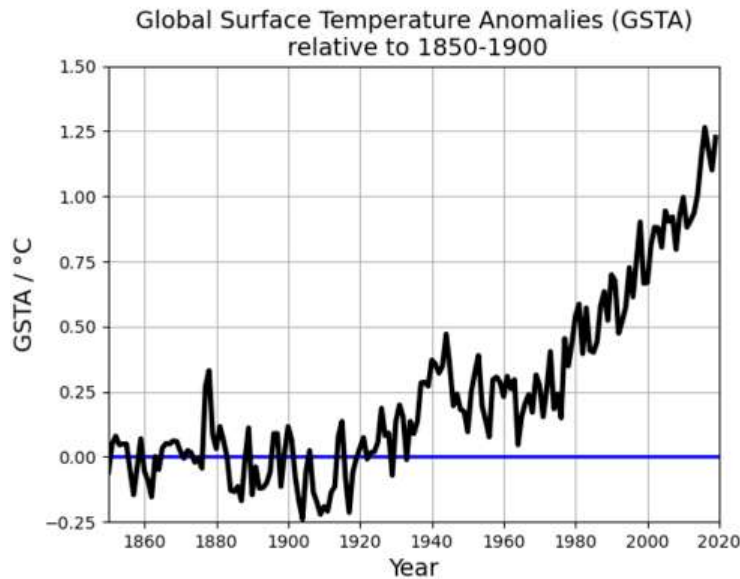


Distribution d'un réchauffement de 4,0 °C



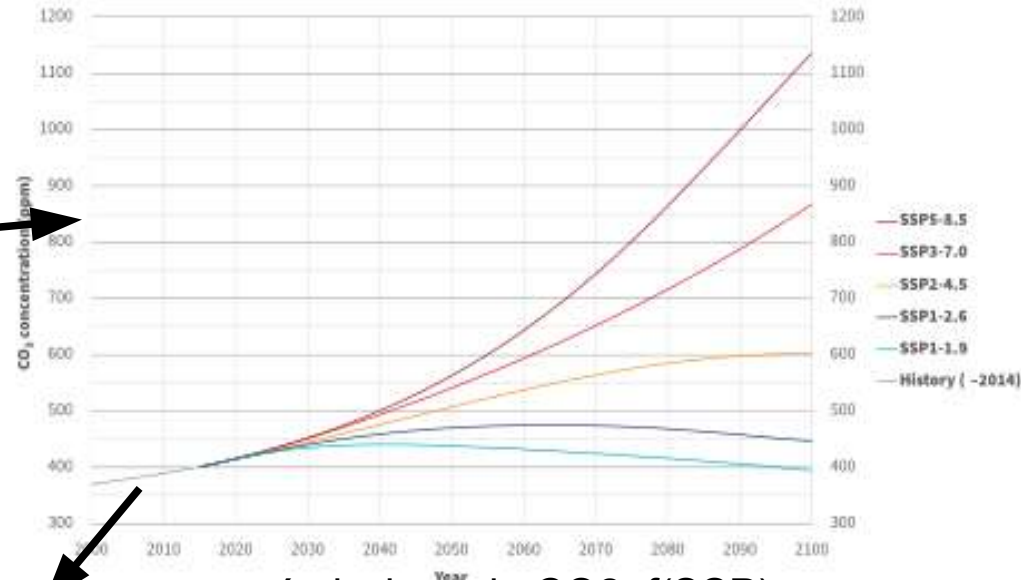
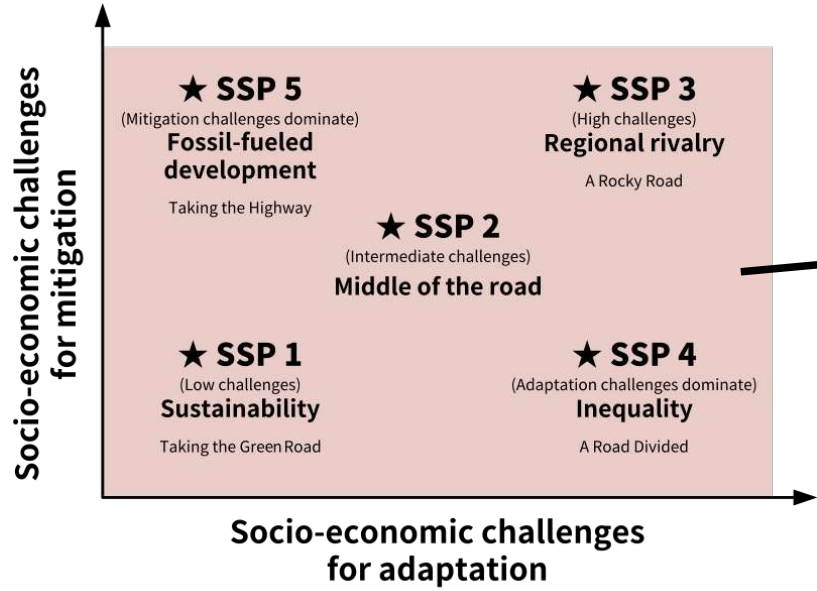
Le GIEC et le changement climatique: observations

Synthèse des changements passés prouvés par les observations



Les scénarios du GIEC

On résume les multiples évolutions humaines possibles par des scénarios SSP "shared socioeconomic paths"



émissions de CO₂=f(SSP)
(et méthane, aérosols, etc)

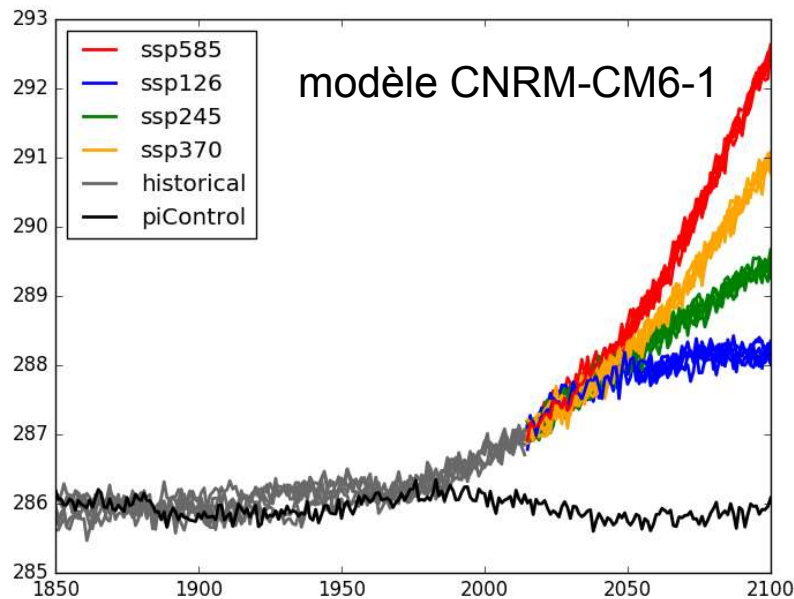
évolutions climatiques

conséquences écologiques,
socioéconomiques etc

Les scénarios du GIEC

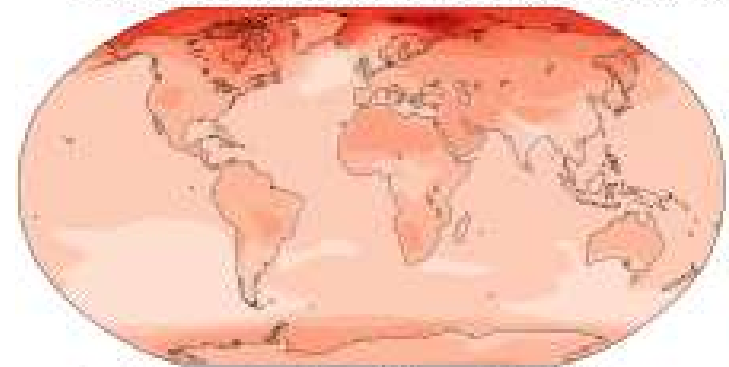
Traduction des scénarios SSPs en climat futur :
simulations GCM

- CMIP: des ensembles de simulations "indépendantes" mises à jour régulièrement
- plusieurs dizaines de modèles et laboratoires **à peu près** indépendants entre eux
- simulations du passé, passé récent et futur (2006-2300)

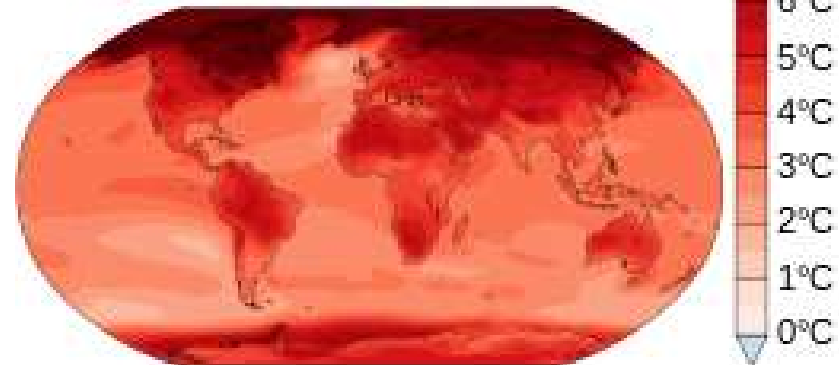


et aussi sécheresses, cyclones,
banquise, inondations, etc
et modèles en aval
(économiques, biologiques)

Distribution d'un réchauffement moyen de 1,5 °C



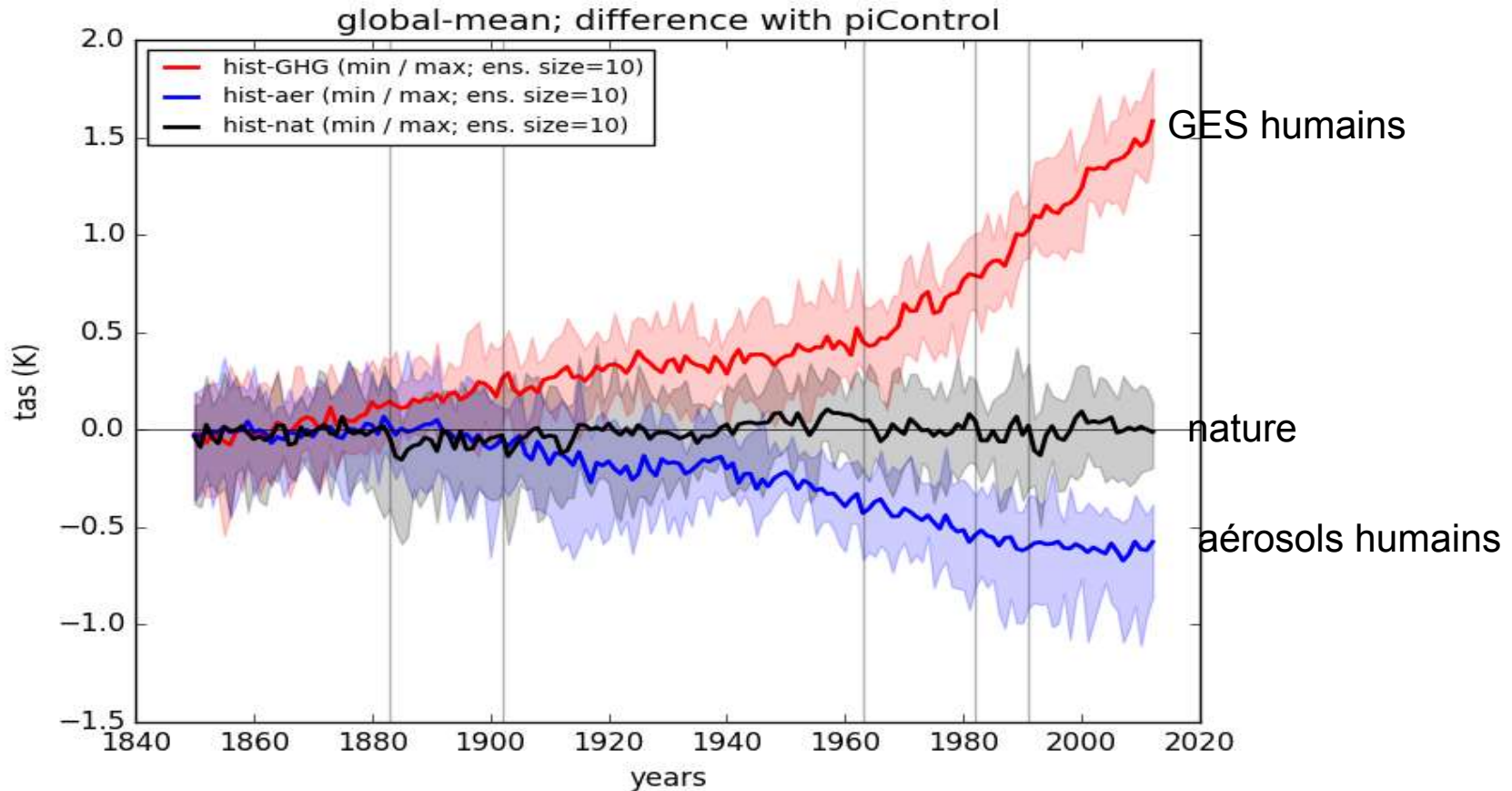
Distribution d'un réchauffement de 4,0 °C



Détection-Attribution du changement climatique

But: détecter les causes des changements observés

on regarde l'impact de différents facteurs dans les modèles



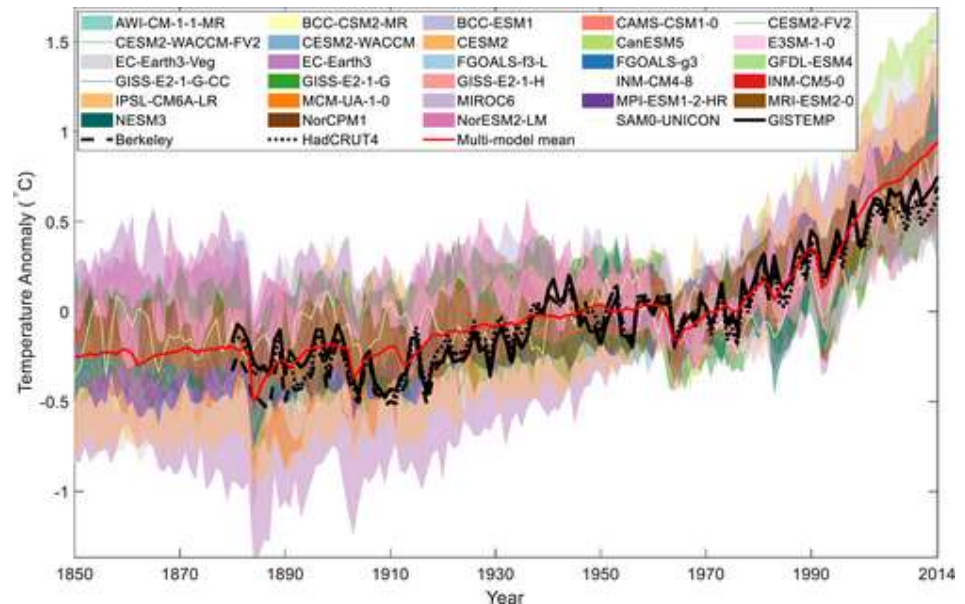
qualification des modèles de climat: le projet CMIP

Coupled Model Intercomparison project

= projet international d'étude de modèles de climat. Permet de sélectionner les meilleurs pour le GIEC

- CMIP6 : utilisé pour le GIEC-AR6 = 33 équipes de modélisation dans 16 pays
- données comparables et accessibles à la communauté
- ex de forçages standardisés:
 - émissions CO₂, CH₄, feux de biomasse
 - évolution des surfaces continentales
 - évolution O₃, aérosols
 - forçage solaire

T simulées et observées sur le passé



Modèles de climat: quelques problèmes

Erreurs systématiques atmosphériques par rapport au climat actuel:

- convection tropicale pas au bon endroit
- jet extratropicaux plus ou moins intenses
- précipitations: trop sec ou trop humide selon les régions
- signe de la rétroaction entre effet de serre et couverture nuageuse

Incertitudes avec les couplages:

- stockage de la chaleur et du CO₂ par les océans

Précision des prédictions:

- impact locaux: peut-on régionaliser les scénarios ?
- changement des fréquences et/ou intensité des événements: neige, vagues de chaleur, sécheresses, inondations...

Recherches aussi sur les adaptations statistiques, les impacts hydrologiques, biologiques, sociétaux...

Incertitudes sur les projections climatiques

Incertitudes sur le changement du forçage radiatif depuis 1750 dans les modèles:
(flux entrant - flux sortant)

- l'effet **direct** des gaz à effet de serre est bien connu: réchauffement

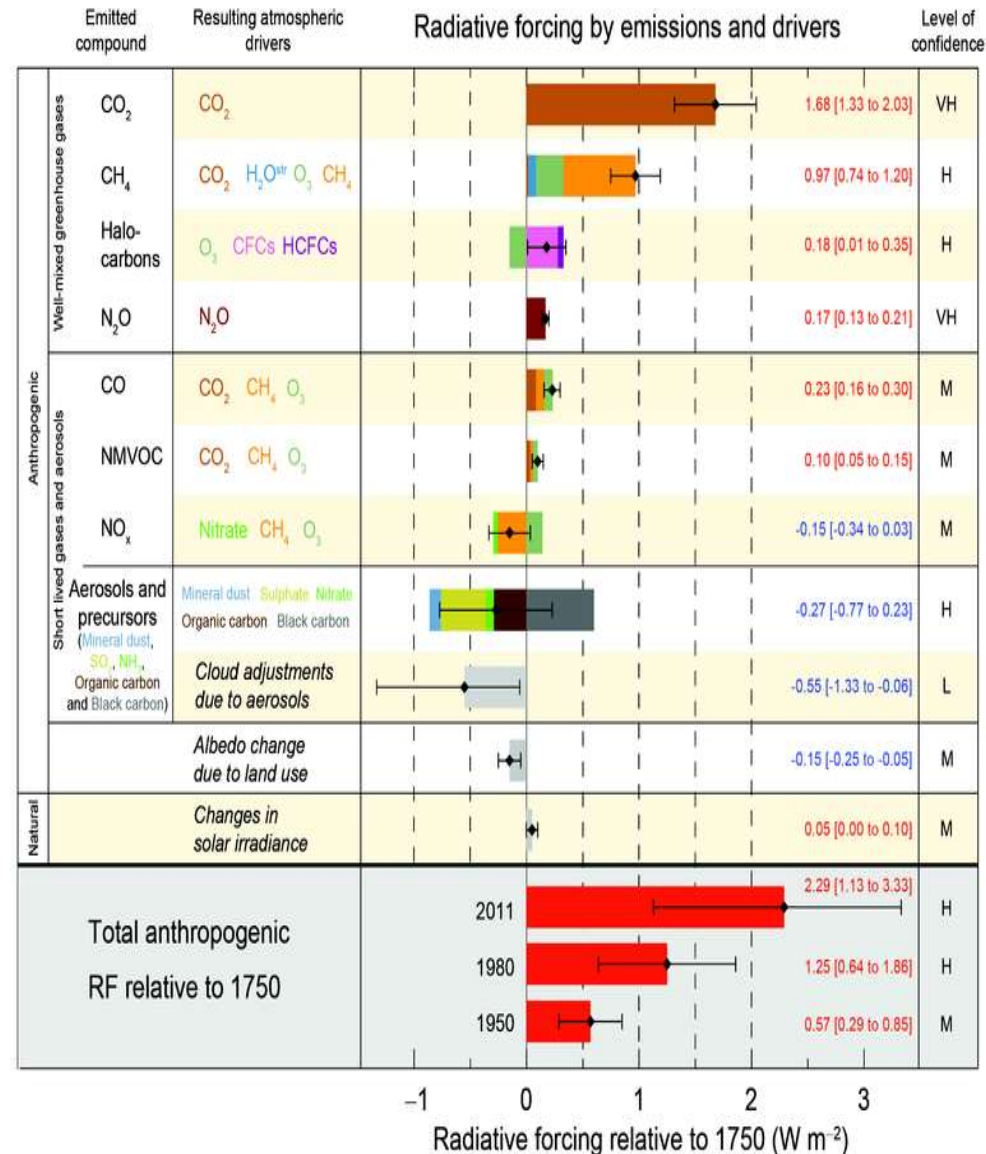
- le CO₂ est responsable de 60% des effets, le CH₄ de 15%

- l'effet des aérosols est **compensatoire**, mais mal connu

- d'où ~60% d'incertitude sur l'effet net des émissions industrielles

(NB: le futur ≠ le passé)

Impact = 'sensibilité climatique':
 $d(T_{\text{surface}})/d(\text{forçage radiatif en } W/m^2)$

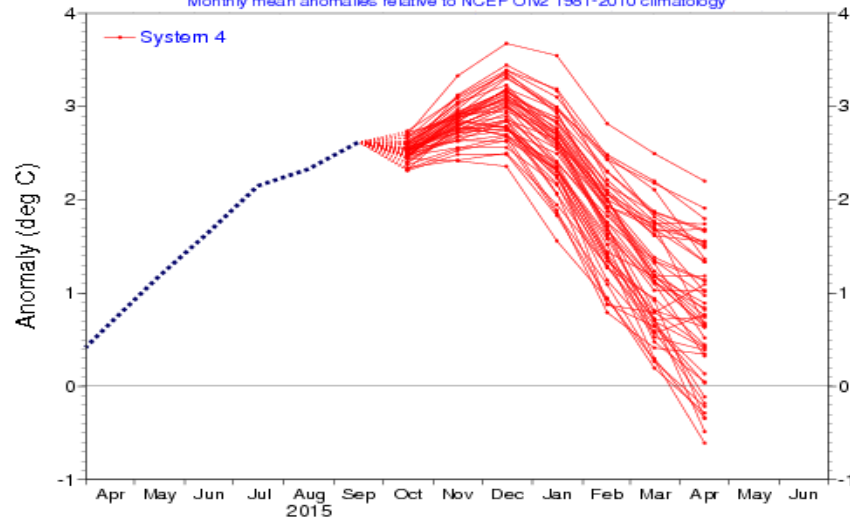


La prévision saisonnière

- activité intermédiaire entre météo et climat
- Echéance ~9 mois, remise à jour ~mensuelle
- modèle couplé atmosphère-océan
- prévision d'ensemble (incertitude sur états initiaux, modèles)
- produits: probabilités d'anomalies

NINO3 SST anomaly plume
ECMWF forecast from 1 Oct 2015

Monthly mean anomalies relative to NCEP OIv2 1981-2010 climatology



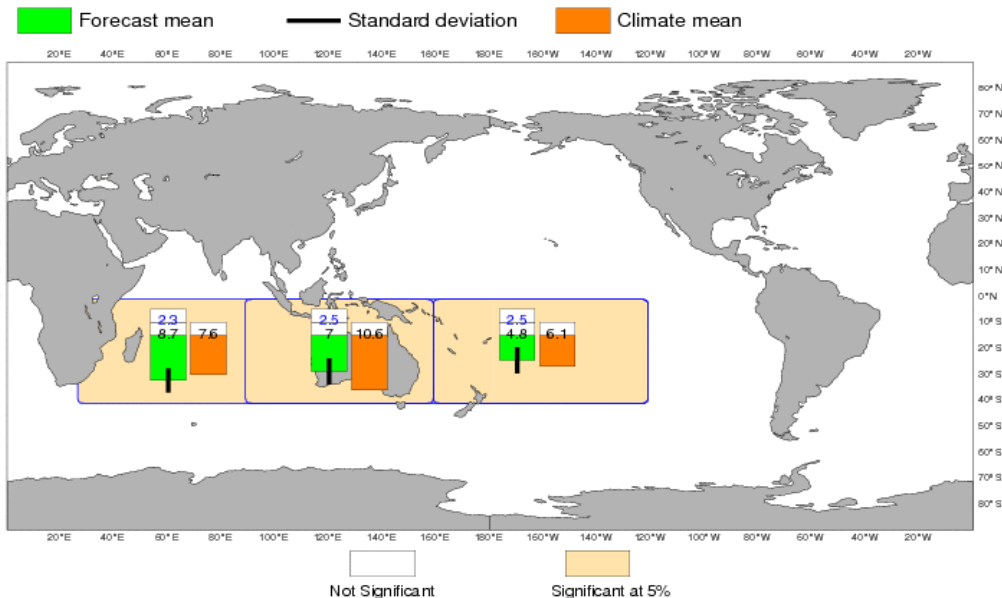
ECMWF Seasonal Forecast

Tropical Storm Frequency

Forecast start reference is 01/10/2015

Ensemble size = 51, climate size = 300

System 4
NDJFMA 2015/16
Climate (initial dates) = 1990-2009



Prévision mensuelle

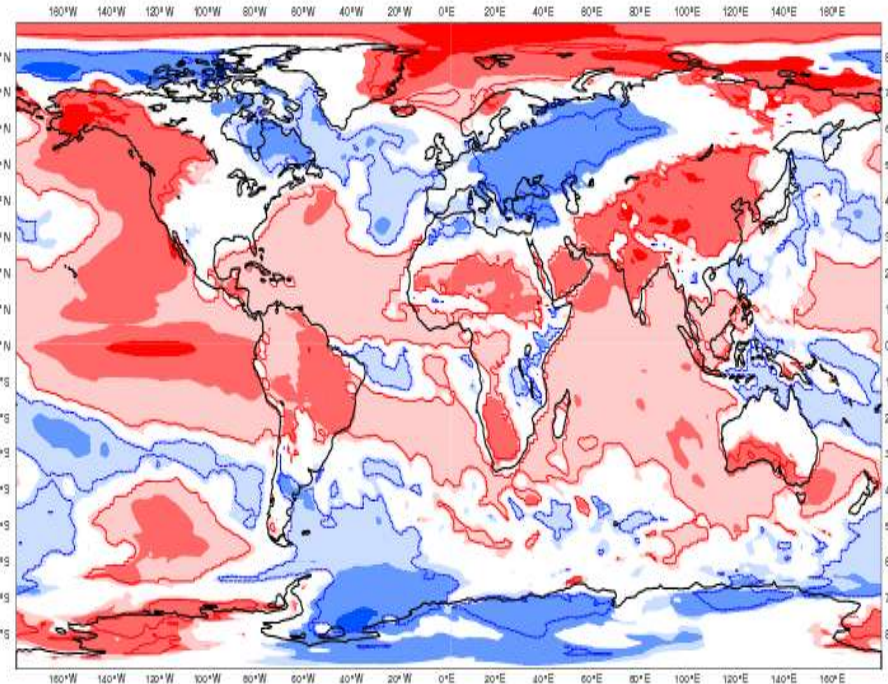
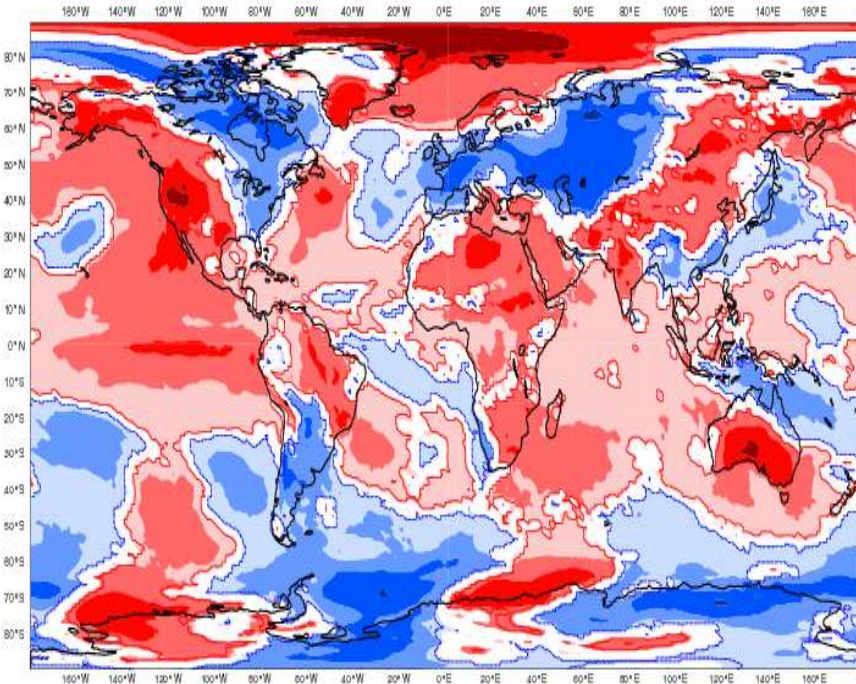
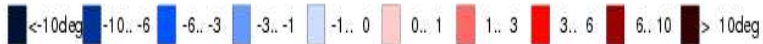
échéance ~1 mois, remise à jour ~hebdomadaire

ECMWF EPS-Monthly Forecasting System
 2-meter Temperature anomaly
 Forecast start reference is 12-10-2015
 ensemble size = 51 , climate size = 680

Day 1-7
 12-10-2015/TO/18-10-2015
 Shaded areas significant at 10% level
 Contours at 1% level

ECMWF EPS-Monthly Forecasting System
 2-meter Temperature anomaly
 Forecast start reference is 12-10-2015
 ensemble size = 51 , climate size = 680

Day 15-21
 26-10-2015/TO/01-11-2015
 Shaded areas significant at 10% level
 Contours at 1% level



Services climatiques 'sans couture'

But: répondre aux questions sur le climat et son changement, ex:

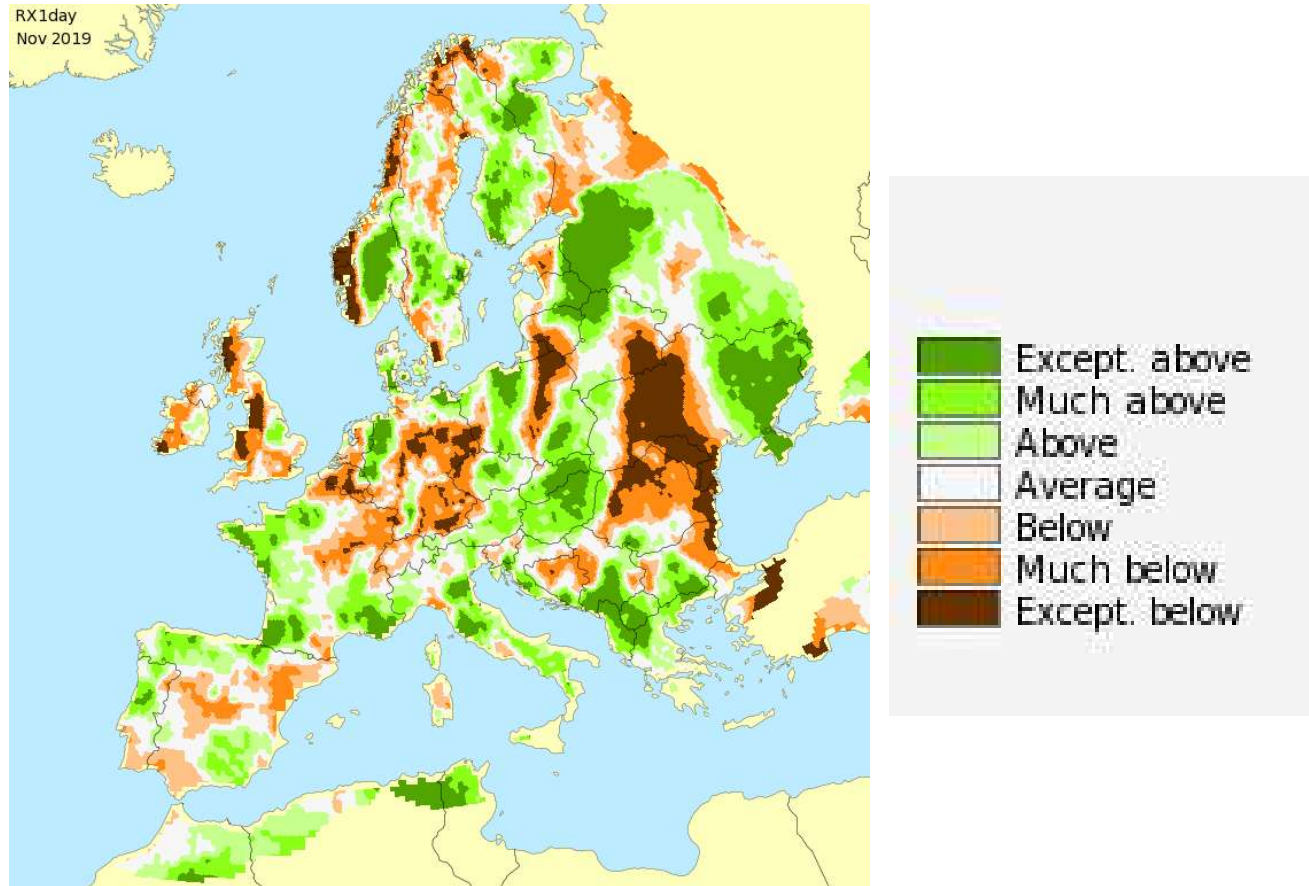
- quel est le climat passé en un point ?
- le climat d'aujourd'hui est-il 'anormal' ?
- comment va-t-il évoluer ? fréquence & intensité des extrêmes ?
- un changement constaté présage-t-il du futur ?
- comment adapter une activité au climat ?

Outils:

- Archives d'observations, ou **réanalyse** s'il n'y en a pas (=analyse homogénéisée dans le temps)
- Prévisions à toutes les échelles de temps: météo, mensuelle, saisonnière, projections climatique
- Présentation unifiée (corrections statistiques)
- nécessite un développement cohérent des modèles et des produits

Services climatiques

diagnostic des précipitations extrêmes (en cumul quotidien) en Nov 2019
(EU Copernicus méthode: obs - moyenne des obs)



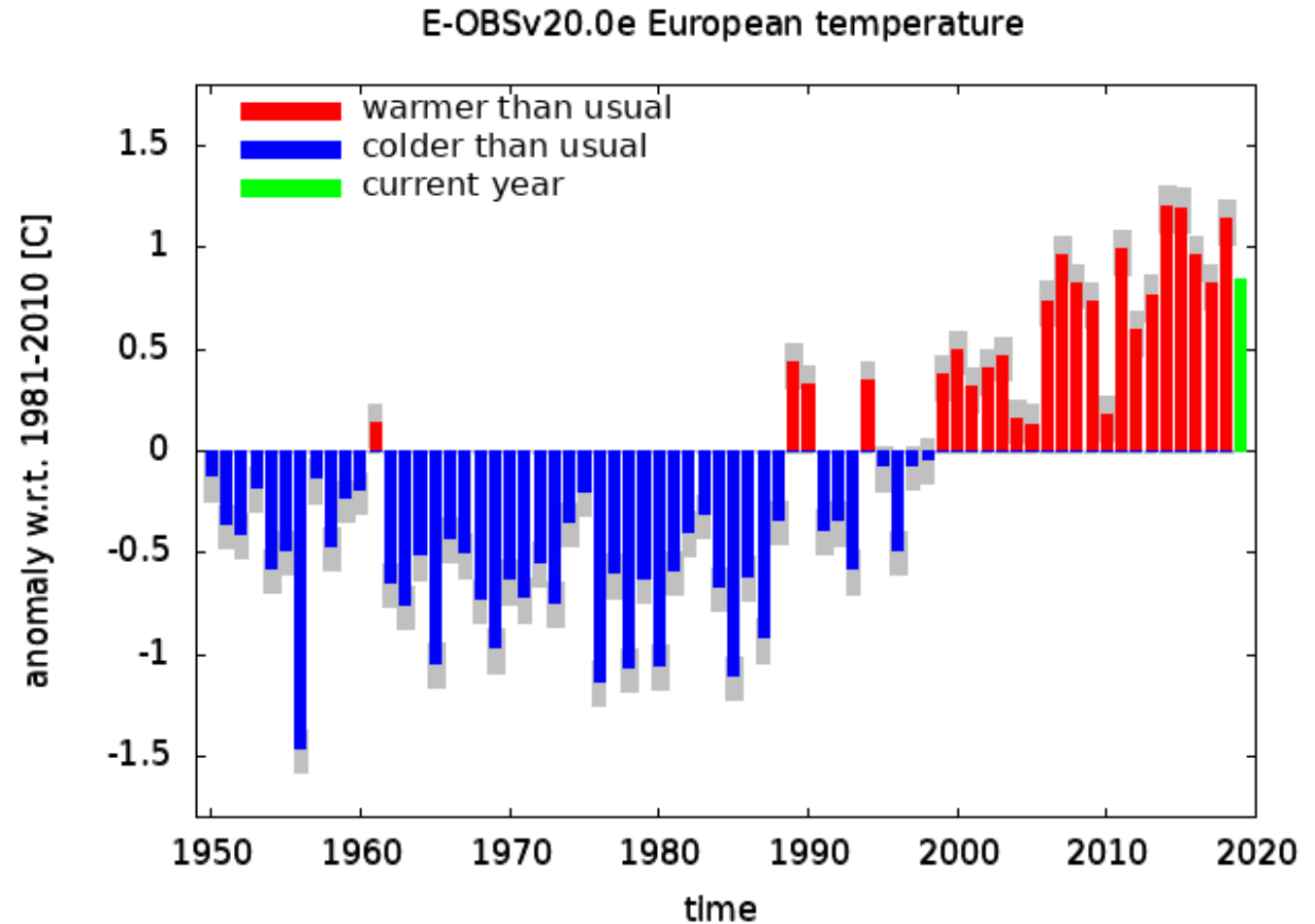
Services climatiques

surveillance de l'évolution des températures globales

méthode: observations [1850-1978] puis réanalyse ERA5 [1979-2019]

sur l'Europe

(source: UE Copernicus)



Services climatiques

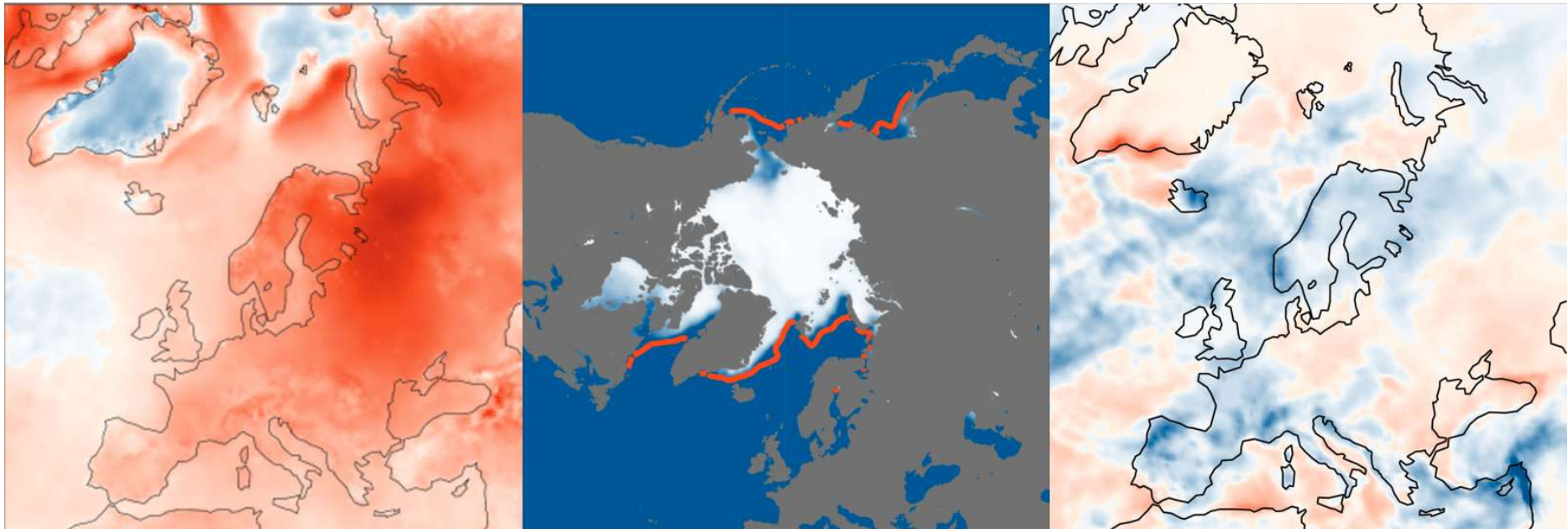
surveillance du climat: décembre 2019
(EU Copernicus climate bulletin)

méthode: observations récentes - réanalyse ERA5 [1979-2020]

anomalie de T2m

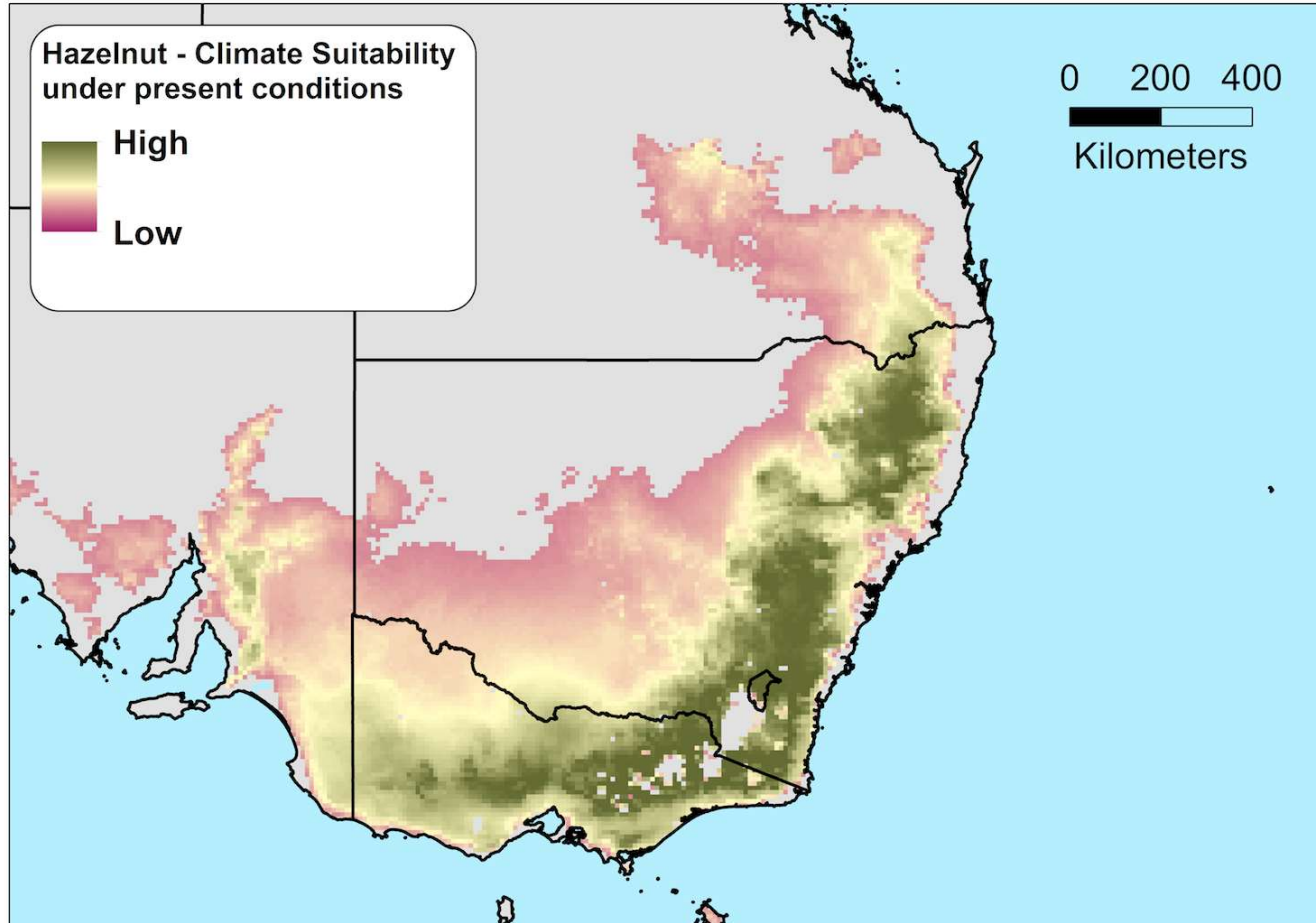
anomalie de banquise

anomalie de pluie



Services climatiques

diagnostic de l'adéquation entre une culture et le climat de 2020-2040
(noisettes Ferrero) méthode: simulations climatiques CORDEX



Conclusion sur le climat futur

Les simulations climatiques sont essentiellement globales, couplées et reposent sur la discrétisation d'**équations physiques** (indispensables pour extrapoler à des climats différents.

Les modèles modernes **reproduisent approximativement** les évolutions passées du climat, ce qui donne confiance

MAIS

- certains phénomènes restent non-résolus numériquement et **mal simulés** (ex: nuages, convection). Certains biais ont été corrigés "à la main" pour coller au climat passé
- et, les modèles sont nombreux et différents mais reposent sur des techniques similaires: il ne sont pas "indépendants" donc leur dispersion **sous-estime les incertitudes des prévisions.**

MAIS

- même si certains détails des simulations sont critiquables, **la gravité du changement climatique actuel, et son origine humaine, ne font aujourd'hui plus aucun doute**

Réanalyses

Le problème :

- les observations historiques du climat sont réparties irrégulièrement, et de qualité variable
- les plus riches (satellites) sont complexes à relier aux variables environnementales concrètes
- accessibilité des informations : champs sur grilles 3D dans archives ouvertes

La solution

- réanalyse = interpolation 4D de "toutes" les observations du système climatique
- valable aussi pour de nombreuses variables non observées (via leur couplage avec les variables observées)

ex.: humidité du sol reconstituées à partir des précipitations et de l'évaporation

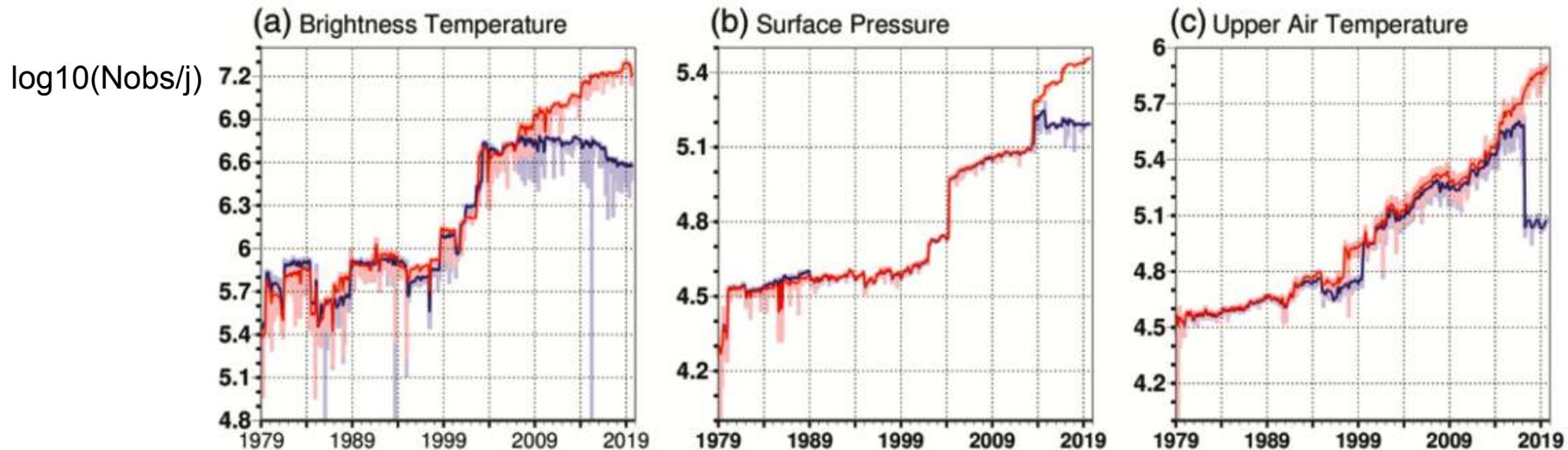
Un outil unique pour étudier le climat et entraîner des modèles IA

Exemple de Réanalyse : ERA5

Réanalyse la plus récente d'ECMWF

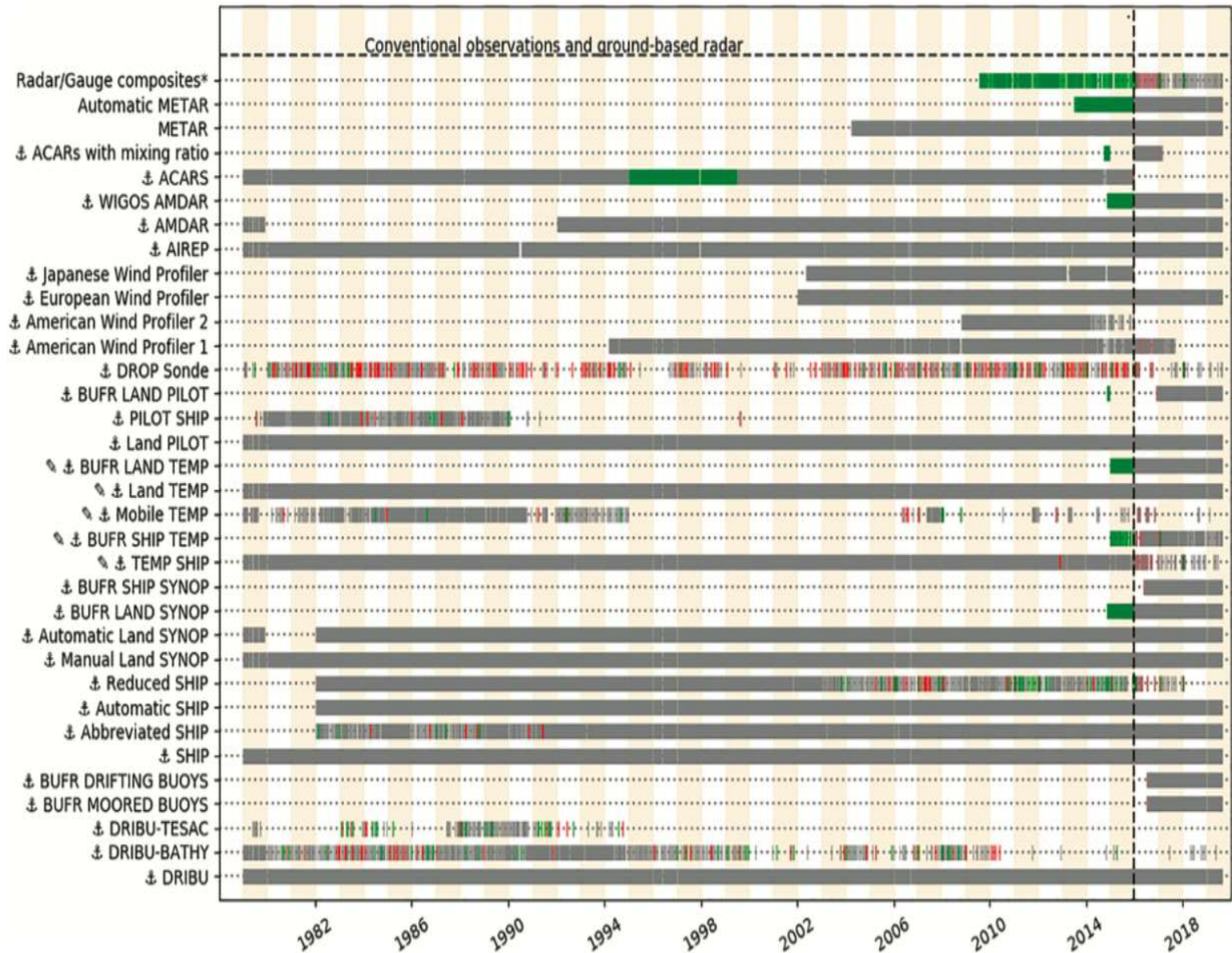
DOI: 10.1002/qj.3803

- couvre à résolution de 1h x 30km x 137 niveaux, de 1950 au présent - 5 jours
- avec estimations d'incertitude
- couplée à des réanalyses des océans, banquises, neige, vagues, surfaces continentales, ozone
- ex de mesure de qualité: corrélation de 77% avec les obs satellitaires de précipitations
- utilise ~100 milliards d'observations (~4 million/j)



Réanalyse ERA5 : observations atmosphériques

obs in situ & radar

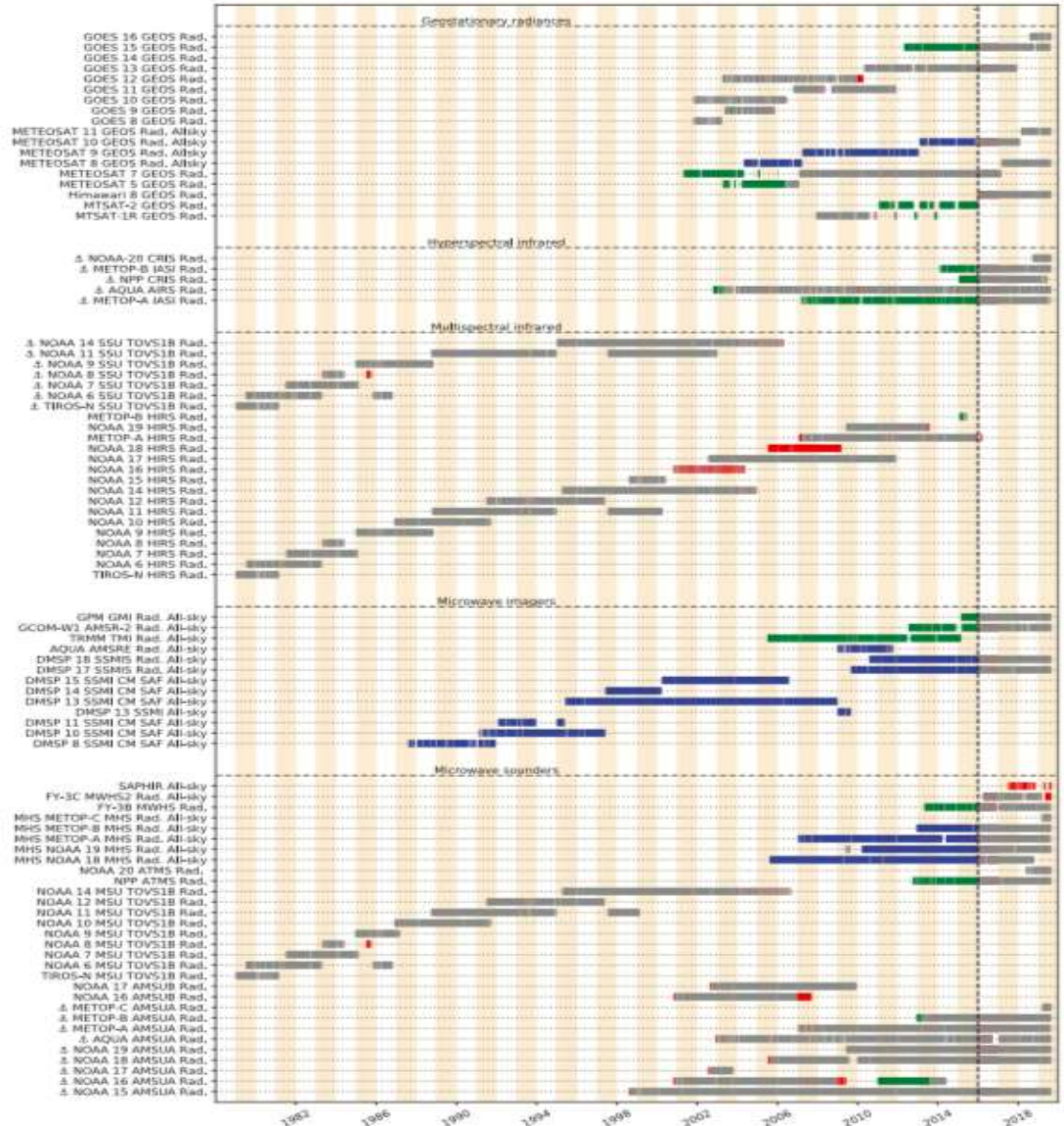


Réanalyse ERA5 : observations atmosphériques

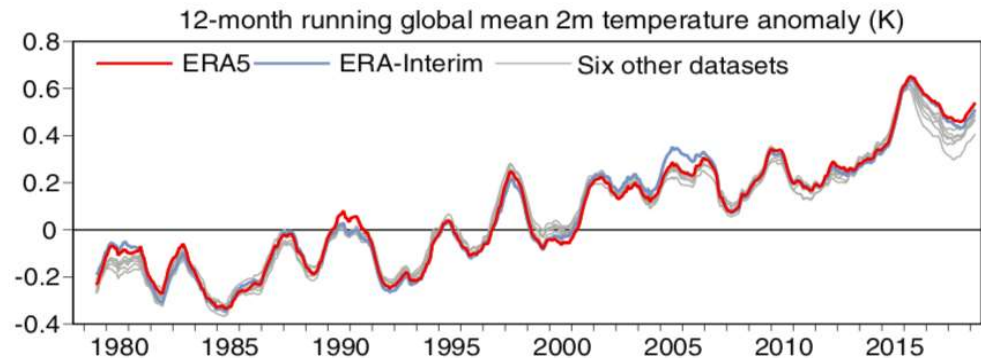
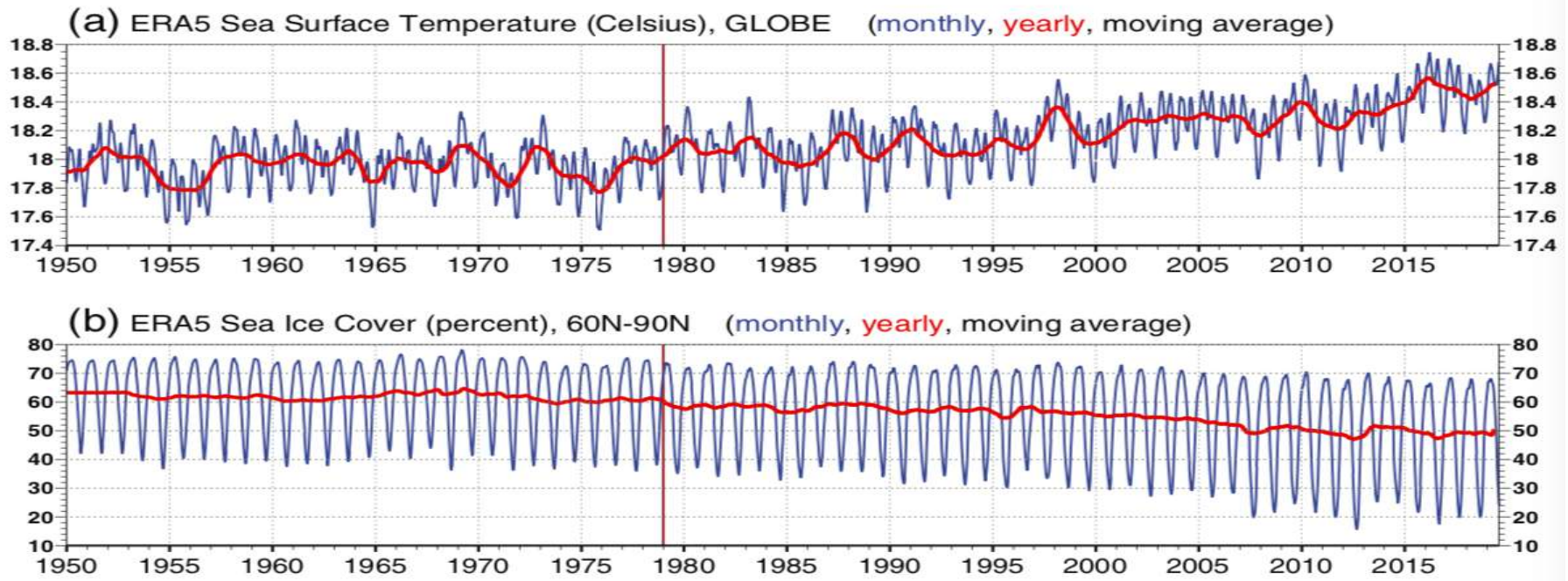
types de données satellites

satellites successifs (obs de radiance)

Instrument / Satellite	Period covered	Agency
<i>Atmospheric motion vectors</i>		
Meteosat 1st Gen.(M-2 to -7)	1982-2000	EU METSAT
Meteosat 2nd Gen.(M-8,-9)	2004-2012	EU METSAT
GMS (-1,-3,-4,-5)	1979, 1987-2003	JMA
MTSAT-1R	2005-2009	JMA
GOES-9	2003-2009	NOAA
GOES GVAR (-8 to 13,-15)	1995-2013	CIMSS
AVHRR (NOAA-7 to -18)	1981-2014	CIMSS
AVHRR (MetOp-A)	2007-2012	EU METSAT
<i>Radiances</i>		
DMSP SSM/I (F-08 to -15)	1987-2008	EU METSAT CM SAF
Meteosat Second Gen. ASRs	2003-2012	EU METAT
IASI* (Metop-A,-B)	2006-present	EU METSAT
CrIsS* (S-NPP/NOAA-20)	2012-present	NOAA
MWHS*/MWHS-2* (FY-3B,-3C)	2012/2014-present	CMA
TMI*/SSMIS*/AMSR-2*/GMI*	2005/2009/2012/2015-2015/(3)present	NASA/DMSF/JAXA/NASA
Ozone channels* (HIRS, AIRS, IASI and CrIS)	1979-present	NOAA, NASA, EU METSAT and NOAA
<i>Radio occultation</i>		
Blackjack (GRACE-A, CHAMP, SAC-C)	2001-2014	UCAR
IGOR (TermaSAR-X, COSMIC-1 to -6)	2006-2014	UCAR
<i>Scatterometer wind</i>		
ASCAT* (MetOp-A,-B)	2007-2014	EU METSAT
Oceansat*	2012-2014	ISRO
<i>Ozone retrievals</i>		
GOME-2 (Metop-A,-B)	2007-2013	ESA/EUMETSAT
GOME (ERS-2)	1996-2002	ESA
MIPAS (ENVISAT)	2005-2012	ESA
MLS (EOS-AURA)	2004-2014	NASA
OMI (EOS-AURA)	2004-2015	NASA
BUV (Nimbus-4)*	1970-1977	NASA
SBUV and SBUV-2 (Nimbus-7)	1978-2013	NOAA
NOAA-9,-11,-14,-16,-17,-18,-19)		
SCHIAMACHY (ENVISAT)	2002-2012	ESA
TOMS (NIMBUS-7, Earth Probe)	1978-2006	NASA
ADEOS-1)	1996-1997	NASDA
<i>Scatterometer soil moisture</i>		
AMI on ERS-1,-2	1991-2006	TU Wien
MetOp-A,-B ASCAT	2007-2014	EU METSAT H SAF
<i>Altimeter wave height</i>		
RA on ERS-1,-2	1991-2003	ESA
AltiKa on SARAL*	2014 onwards	CNES/ISRO
SIRAL on CryoSat-2*	2014 onwards	ESA
Poseidon-2 on Jason-1	2001-2010	NASA / CNES
RA-2 on Envisat	2002-2012	ESA



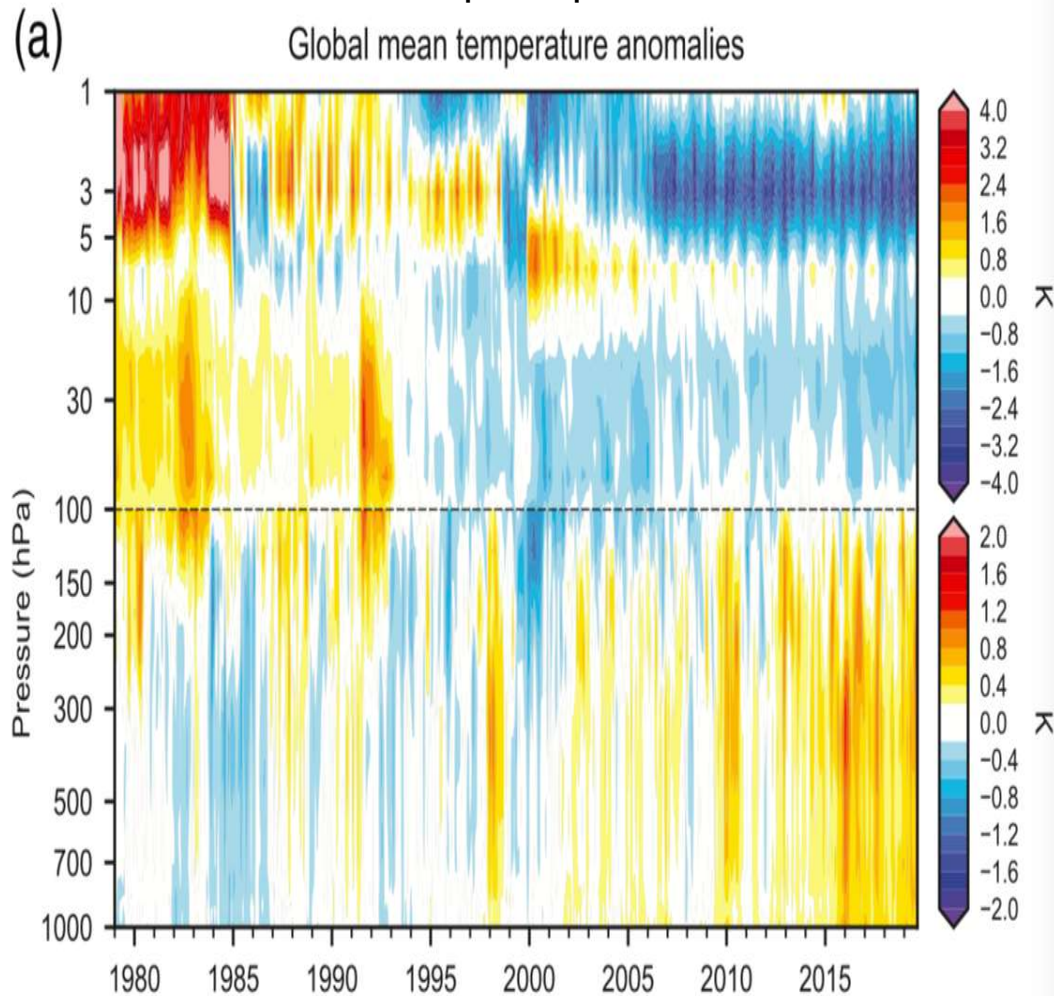
Réanalyse ERA5 : tendances



Réanalyse ERA5 : tendances

évolution de la température
atmosphérique 3D

Global mean temperature anomalies



évolution des incertitudes
sur la température à 3 niveaux

