

Journées CNRS, Groupe de recherche MACS, Grenoble, 5-6 octobre 2015.
Groupe de Travail Identification.

Changement climatique : Identification et attribution

Philippe de Larminat

Dernière affiliation : IRCCyN-ECN-Nantes

Contact : larminat@wanadoo.fr

Septembre 2014:

Changement climatique

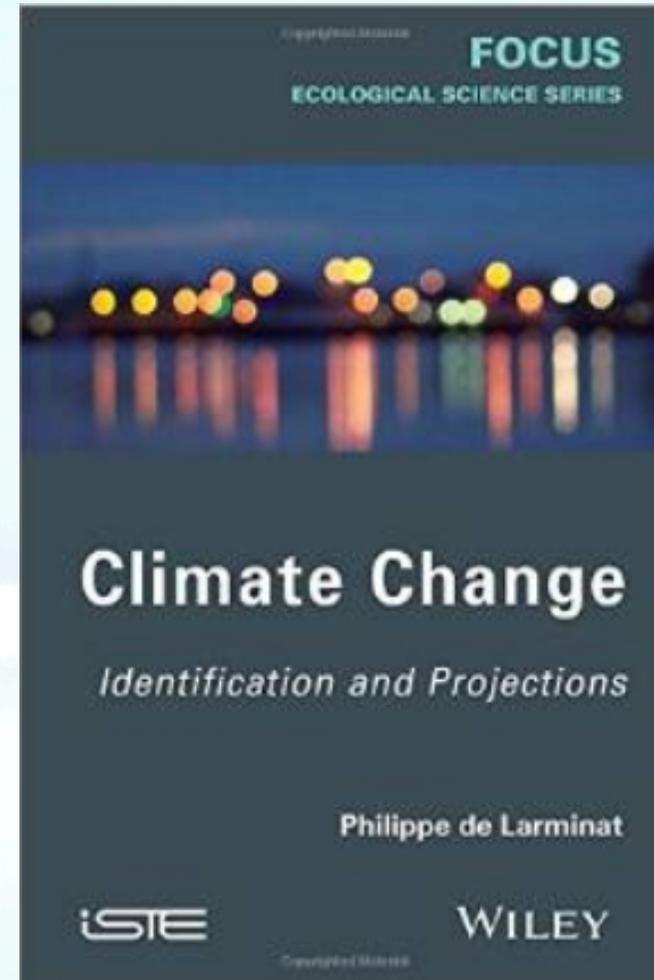
Identification et projections

ISTE

WILEY, déc. 2014 :

Octobre 2015 :

Identification et attribution



Attribution ?

La « Détection et Attribution » est un ensemble de techniques de traitement des modèles et des observations, développé dans le contexte des sciences du climat.

La D&A est étroitement apparentée à l'identification des systèmes dynamiques.

Plan

1. Introduction
2. Identification
3. Détection et attribution
4. Conclusions

1. Introduction

Identifier le système climatique ?

Cela n'avait jamais encore été fait.

Ambition initiale : affiner les modèles et projections climatiques.

À l'arrivée, les conclusions sont peu compatibles avec le discours médiatique et politique dominant, abrité sous la caution scientifique du GIEC.

Le GIEC

GIEC : Groupe **Intergouvernemental** sur Évolution Climatique
(IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change)
Organisme **politico-scientifique** , suscité par l'ONU.

Mission officielle : « évaluer les risques ... liés au **changement climatique d'origine humaine** (sic) ».

Production du GIEC : Rapports d'évaluations périodiques quinquennaux
(Assessment Reports) : FAR, SAR, TAR, AR4 (2007), AR5 (2013).

Les rapports du GIEC (1 550 pages pour les fondements scientifiques) font l'objet
d'un « résumé pour les politiques » : **Summary for PolycyMakers (SPM)**

Le GIEC organise aussi les COP. (COP 15 : Copenhague, COP 21 Paris)

Le Giec ne fait pas de recherche climatique, mais il l'évalue et l'oriente.

Par extension, les « **chercheurs du GIEC** » sont ceux qui élaborent ses évaluations
et adhèrent à ses conclusions.

Position du GIEC

Communiqué de presse:

(26/09/2013, Stockholm, extrait du SPM (Summary for PolicyMakers), résumé pour les décideurs du 5^{ème} rapport d'évaluation du groupe 1 du GIEC (AR5).

« Il est *extrêmement probable* que l'influence de l'homme soit la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du xx^e siècle »

Les probabilités selon le GIEC

La terminologie du GIEC est codifiée minutieusement (eg. *très probable* = 90 %, *extrêmement probable* = 95 %, etc.)

Mais comment les probabilités sont-elles déterminées ?

5^{ème} Rapport d'évaluation (2013) du GIEC (AR5, 1.4.3, p 139) :
Les mesures quantifiées d'incertitude d'un résultat exprimé en termes probabilistes [sont] basés sur l'analyse d'observations ou de résultats de modèle, ou de jugement d'expert.

- ➔ **Analyse d'observations. Techniques d'analyses ? L'identification n'en fait pas partie.**
- ➔ **Résultats de modèle : validité des modèles de connaissance ?**
- ➔ **Jugement d'experts : subjectif par définition.**

Sensibilité climatique (à l'équilibre au doublement de CO₂)

Extrait du résumé à l'intention des décideurs :

« Il est *extrêmement improbable* que la sensibilité climatique soit inférieure à 1°C (*degré de confiance élevé*) et *très improbable* que celle-ci soit supérieure à 6 °C (*degré de confiance moyen*) ».

Ces *probabilités* (et *degré de confiances*) ont été discutées et entérinées par consensus en assemblée plénière du GIEC (192 délégations gouvernementales).

CR des débats du mercredi 25 sept. 2013

<http://www.iisd.ca/download/pdf/enb12581f.pdf>

Évaluation des réponses du système climatique: À propos de la sensibilité du climat à l'équilibre, plusieurs délégations, dont l'Australie, les Pays-Bas et d'autres, ont fait remarquer que l'information présentée dans l'AR4 selon laquelle la limite inférieure de la marge « probable » évaluée de la sensibilité du climat est inférieure à 2°C peut être source de confusion pour les décideurs, et ont suggéré d'indiquer que cette limite soit la même que dans les évaluations précédentes.

Une première dans l'histoire des sciences : des plages d'incertitudes probabilisées, évaluées par négociation entre des délégations gouvernementales.

Un calcul élémentaire

- La Terre reçoit en moyenne 342 Wm^{-2} du soleil. À l'équilibre thermique, elle doit en évacuer autant, par réflexion et émission IR.
 - En cas de doublement de CO_2 , le rayonnement émis serait réduit d'environ 3.4 Wm^{-2} (*Forçage radiatif calculé à partir du spectre d'émission IR du CO_2*)
 - Pour les évacuer, la température terrestre doit augmenter globalement d'environ $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (*D'après la loi de Stephan, pour une température d'émission de $-18 \text{ }^\circ\text{C}$*).
- ➔ **Sensibilité climatique** (à l'équilibre au doublement de CO_2) : $S_{\text{clim}} \sim 1 \text{ }^\circ\text{C}$, à la limite basse extrême de la fourchette annoncée.

En réalité

- **Forçage radiatif** : calcul complexe, mais valable seulement **par ciel clair et sans aérosols**. Nébulosité moyenne → - 25 %
- **Rétroactions secondaires antagonistes** :
Réchauffement global → + de vapeur d'eau atmosphérique
+ de vapeur d'eau → + de forçage radiatif
→ + de nuages (effet parasol)

La réaction de Stephan pourrait être très affaiblie.

Il est impossible de déterminer avec la quelque précision la sensibilité climatique par un calcul direct global → Il faut passer par des modèles dynamiques détaillés, et déterminer les sensibilité à l'équilibre par simulation.

Modèles du GIEC

= modèles numériques

= modèles de connaissance

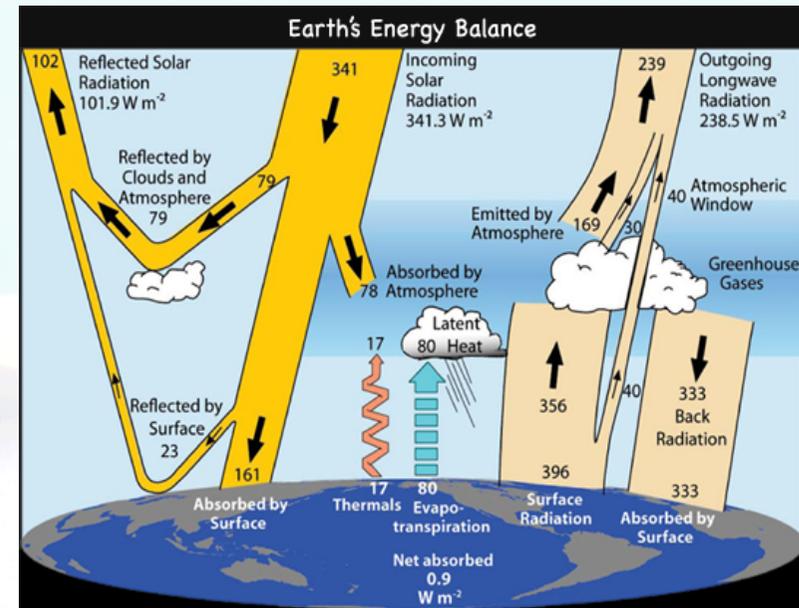
Intégration par **éléments finis** sur des milliers de cellules atmosphériques et océaniques interconnectées : transferts de matière, de chaleur, etc.

Connaissances :

1. Lois physiques fondamentales (mécanique, thermodynamique, rayonnement...), et les constantes associées.
2. **Une quantité de représentations empiriques.**

Exemples :

1. Condensation de l'humidité en nuages : la sursaturation est fonction de la composition chimique, des aérosols, du niveau de rayonnement cosmique...
2. Rayonnement, diffusion, réflexion par les nuages, fonction de la dimension des gouttelettes ou de la forme des cristaux de glace.
3. Évaporation-transpiration : fonction de la nature des végétaux, du vent, etc.



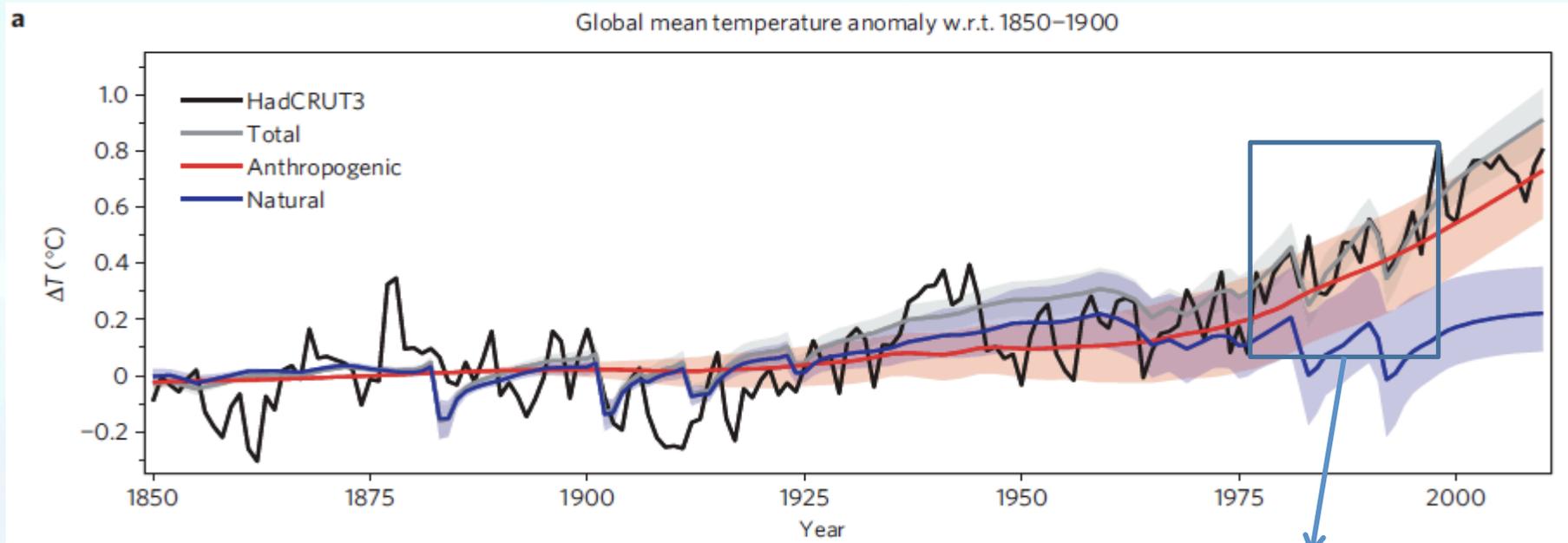
En manipulant les paramètres des représentations empiriques, on peut faire dire tout ce qu'on veut aux modèles.

Une nécessité :

Valider des modèles numériques

- Exhaustivité et de la fiabilité des connaissances ?
- Mesure expérimentale des bilans et rayonnement énergétique ?
- Validations ponctuelles (eg. profils atmosphériques) ?
- Confrontation simulations / observations ?
- **Confrontation avec des modèles identifiés ?**
- **Selon des règles de l'art spécifiques (détection et attribution) ?**

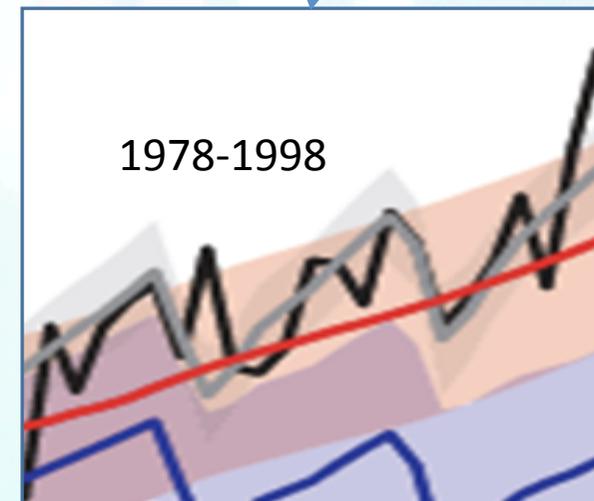
Simulation : période historique



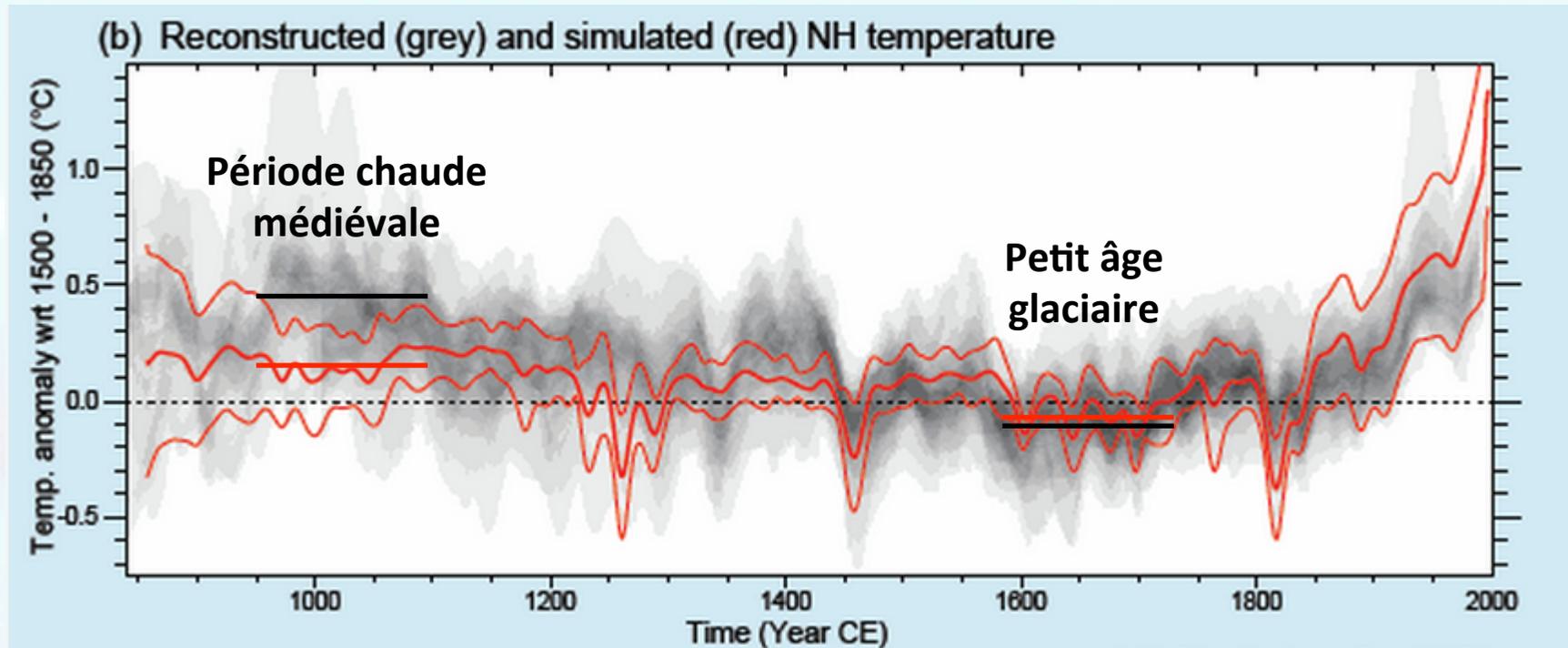
Source : [Meehl et al. \(2004\)](#)

**Seule période vraiment convaincante : 1978-1998.
Vingt ans !**

Répartition naturel / anthropique : on fait ce qu'on veut avec les paramètres ajustables.



Simulations millénaires



Source: [IPCC Climate Change 2013: Technical Summary](#), p.78

Simulations : 0.3 °C d'écart entre la période chaude médiévale et le petit âge glaciaire.

Reconstructions paléoclimatiques : 0.6 °C d'écart (hémisphère Nord).

1. Introduction

2. Identification

3. Détection et attribution

4. Conclusions

Le système à identifier

Entrées causales (dites facteurs de forçage) :

1. Concentration de CO₂ (u_1) : *indicateur d'activité humaine*
2. Irradiance solaire (u_2) : *indicateur d'activité solaire*
3. Profondeur optique d'aérosols (u_3) : *indicateur d'activité volcanique*

Sortie :

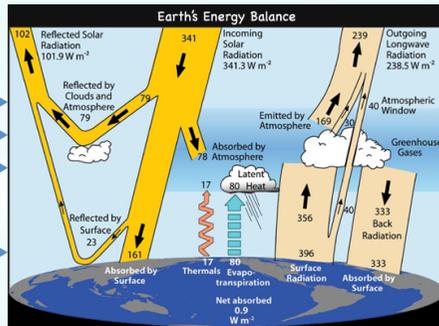
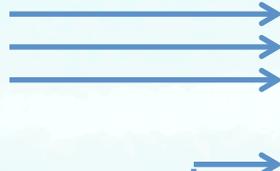
Température moyenne globale de surface T_G .

u_i : écarts p. r. aux valeurs d'équilibre préindustrielles supposées.

T_G : anomalie p. r. à une référence arbitraire.

Structure physique

Facteurs de forçage u_i



Machine radiative atmosphérique

Bilan radiatif



Accumulation répartition océanique

Température globale de surface T_G

L'inertie thermique de l'atmosphère est 1 000 fois inférieure à celle des océans → la machine radiative est un système algébrique.

Structure mathématique

Après linéarisation :

$$T_G = T_E + G(s)(S_1u_1 + S_2u_2 + S_3u_3)$$

$$\text{où : } G(s) = \frac{1 + C_1s + C_2s^2}{(1 + s)(1 + 10s)(1 + 100s)}$$

→ Six paramètres à identifier : $T_E, S_1, S_2, S_3, C_1, C_2$

(dont S_1 : sensibilité climatique)

Observations

Mesures « historiques » (1850-2015)

Toutes les sources concordent bien

Observations « paléoclimatiques » : évalués à travers des **mesures de substitution** ou *proxies*.

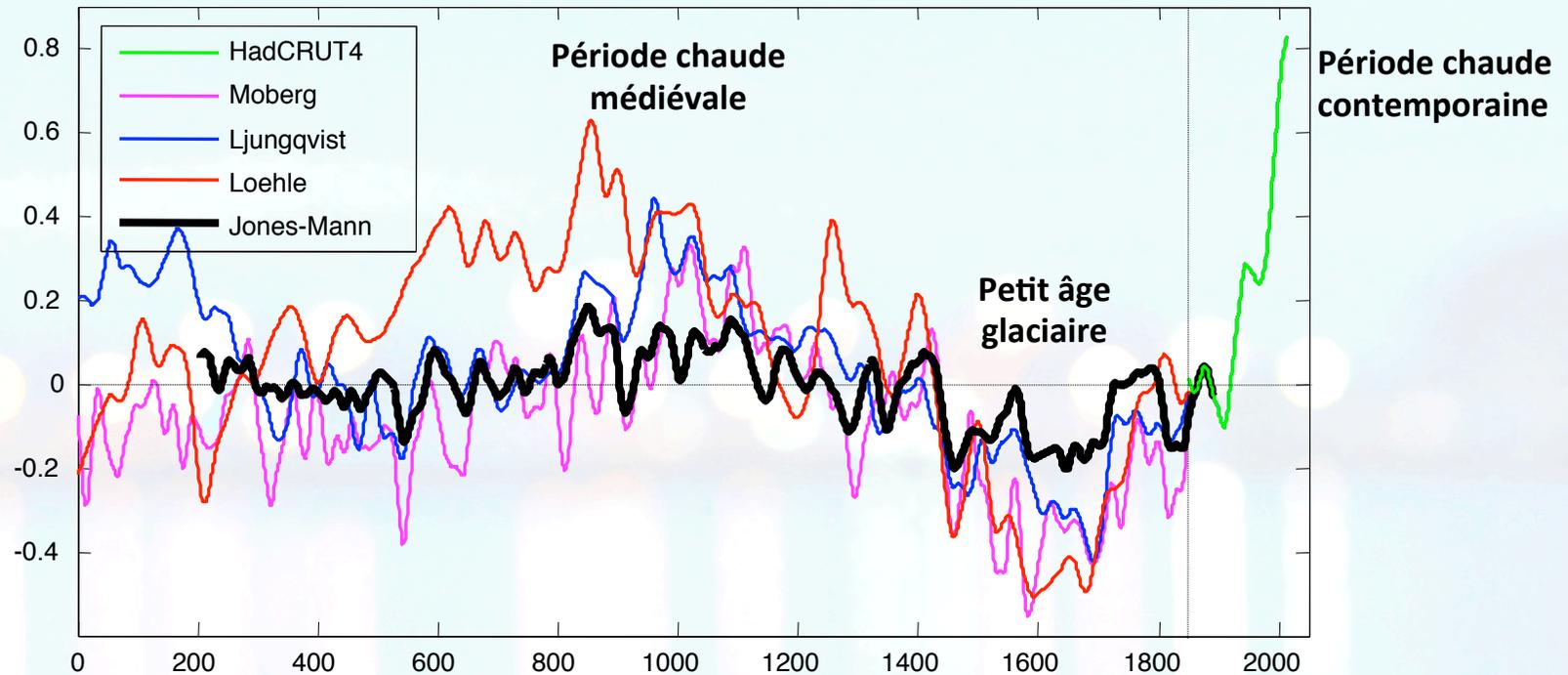
Les reconstructions disponibles ne sont généralement pas raccordées aux observations historiques, et pas toujours calibrées.

Les signaux de concentration de CO₂ et d'activité volcanique ne donnent pas lieu à polémique. Les autres sont beaucoup plus dispersées. selon les proxies et les traitements statistiques.

J'ai réuni un panel de quatre reconstructions de température et de quatre reconstructions d'irradiance solaire.

➔ En combinant, on a 16 jeux de données d'entrée-sortie, conduisant à des résultats d'identification différents.

Panel de températures (raccordées à Hadcrut4)



- Les tracé extrêmes (Jones-Mann et Loehle) sont peu compatibles
- La courbe de Jones & Mann est quasiment en *crosse de Hockey*

Guerre des graphes

La « courbe en crosse de hockey » (tracé rouge) a suscité des polémiques intenses. Elle efface les grands événements climatiques : période chaude médiévale (1000-1400) et le petit âge glaciaire (1600-1800).

Si la reconstruction est correcte, la période chaude contemporaine s'explique par l'accroissement de la concentration de CO₂ (tracé bleu).

Dans le troisième rapport (2001) la courbe en crosse de Hockey était reproduite à plusieurs reprises.

Fortement controversée, elle a été éliminée du quatrième rapport (2007).

Dans le cinquième rapport (2013), la référence bibliographique elle-même a disparu (M. Mann, 1999-2000) .

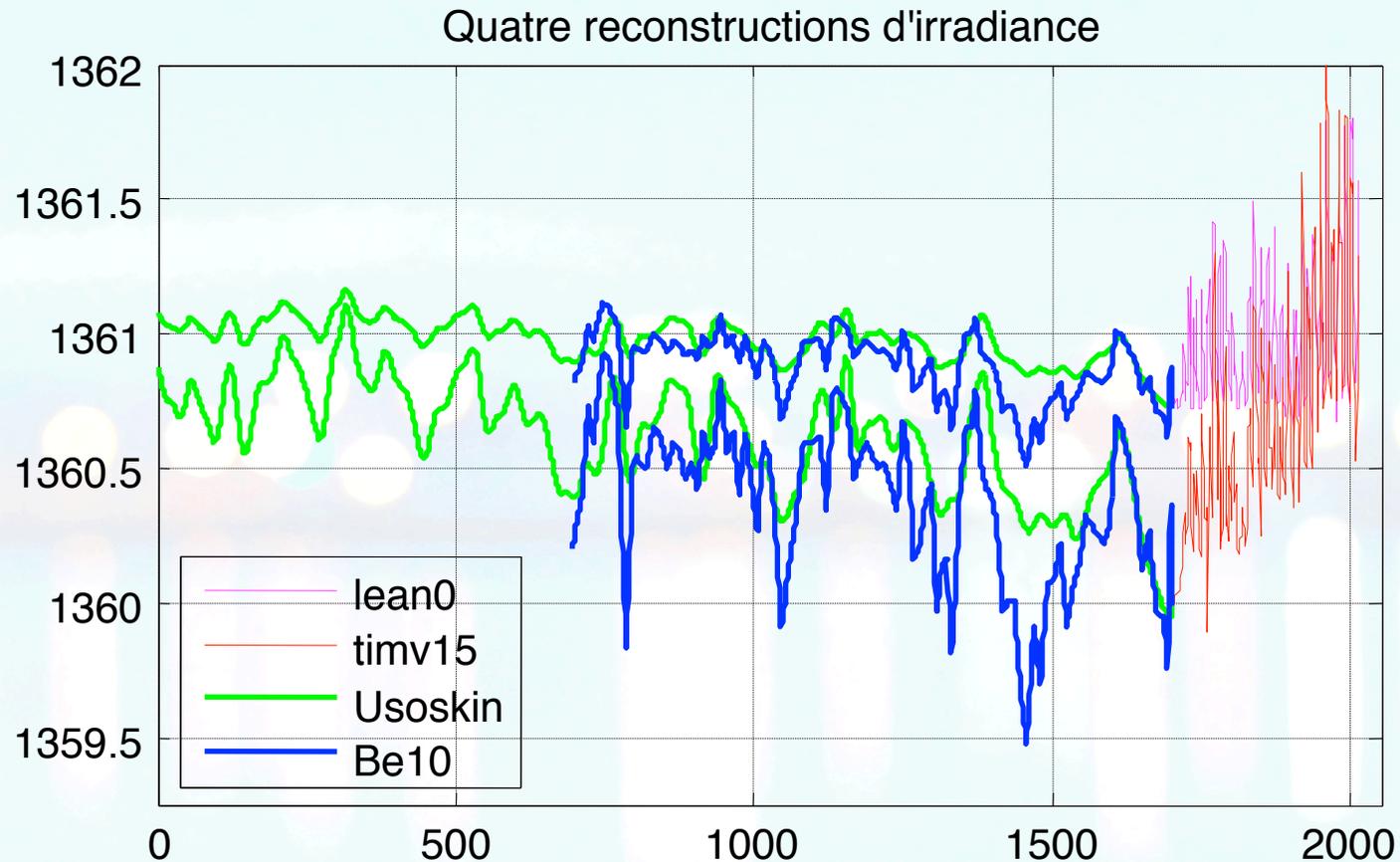
Le GIEC la désavoue, mais les manuels de SVT continuent à l'exploiter.

http://fr.wikimini.org/wiki/R%C3%A9chauffement_climatique



$$S_{\text{clim}} = 1.5^{\circ}\text{C}$$

Panel d'irradiances solaires



Deux proxys béryllium 10 sont connectés à deux reconstructions composites. Les proxys ne permettent pas de reconstituer les cycles de Schwabe (11 ans). Même les mesures satellitaires font débat !

Résultats d'identification

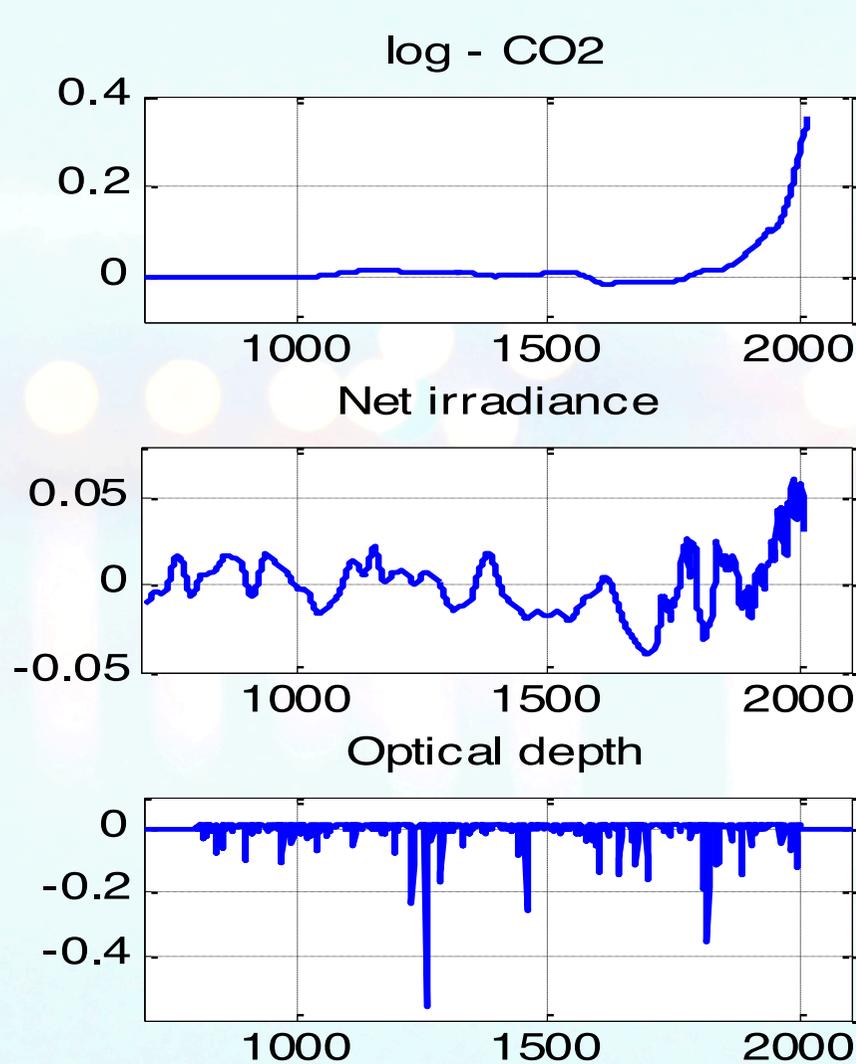
Méthodes : OE, PEM, ARMAX, B&J, MCI...

La plus naturelle et la moins manipulable : OE
(Output Error method) :

Minimisation de l'erreur de sortie

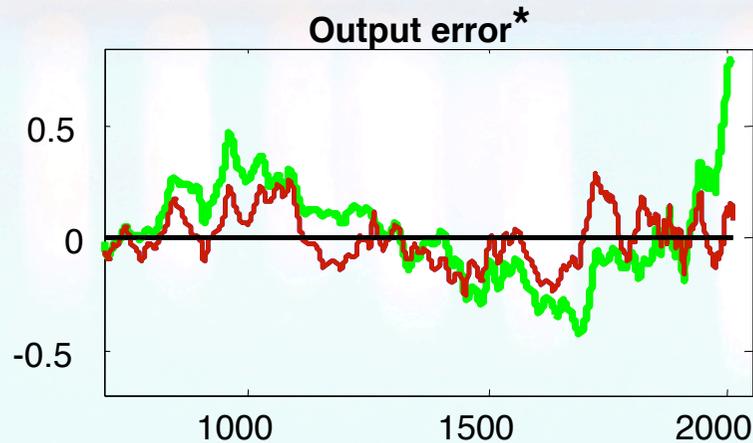
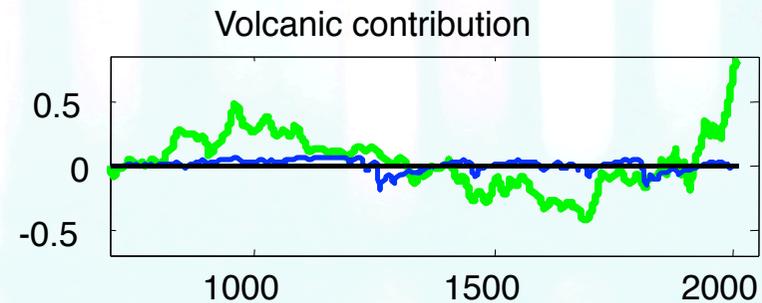
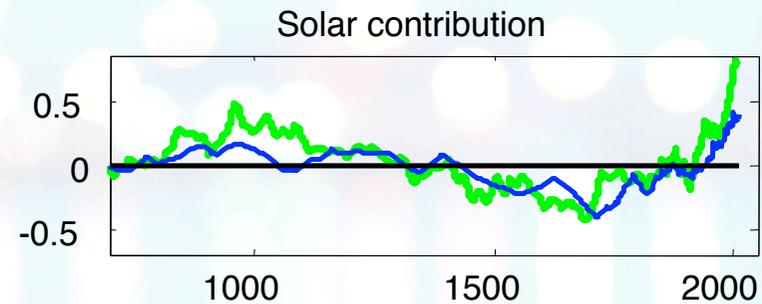
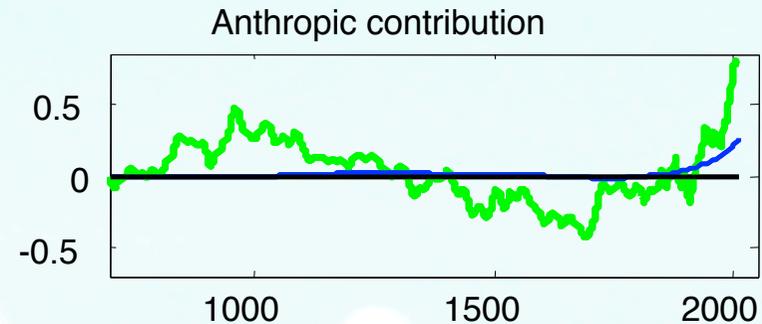
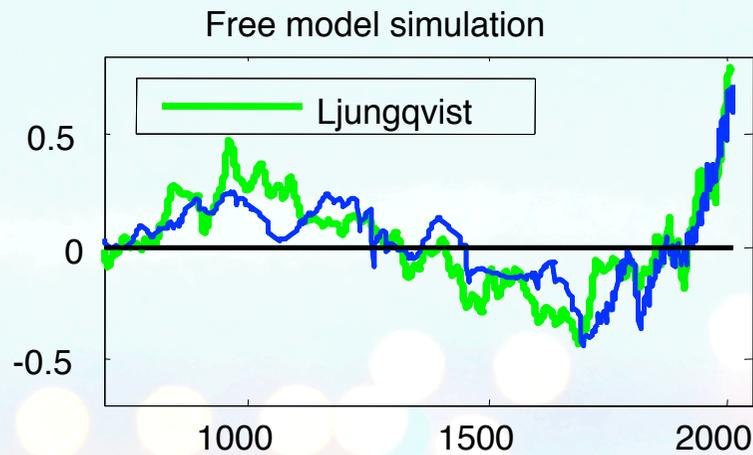
L'OE se prête à des calculs d'incertitude et à des tests d'hypothèse.

Une combinaison particulière : No 6/16 : [Usoskin x timv15] x Ljungvist



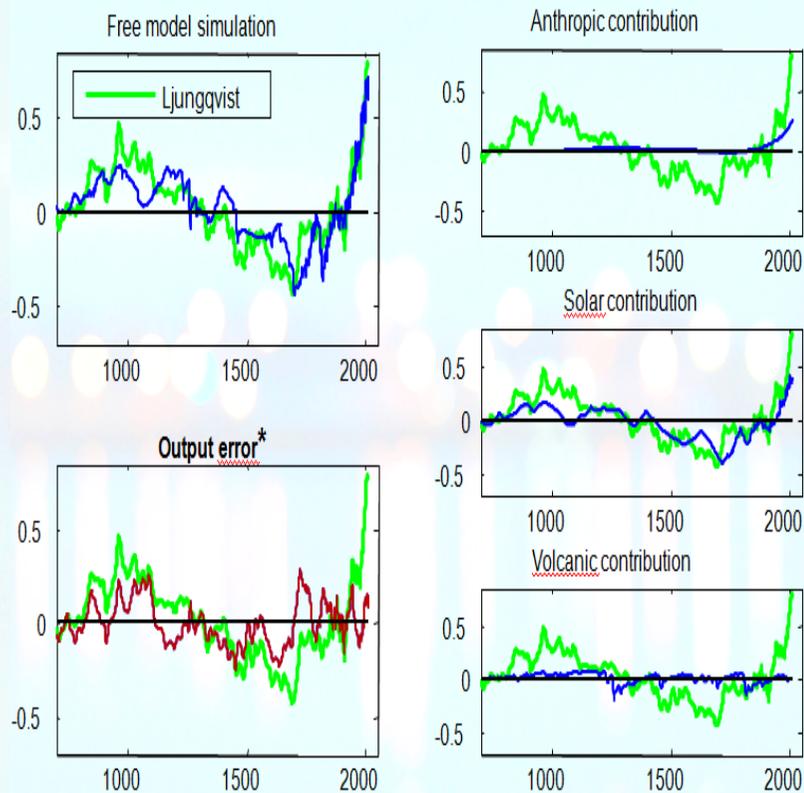
Identification libre

Les données « parlent » librement, sans contrainte.



***Erreur de sortie** = bruits de mesure et erreurs de reconstruction
+ erreur de modèle + **variabilité interne**

Contributions



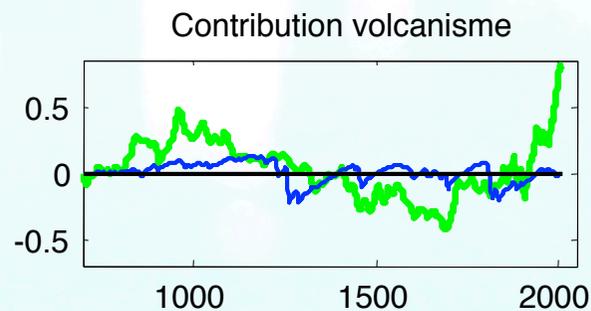
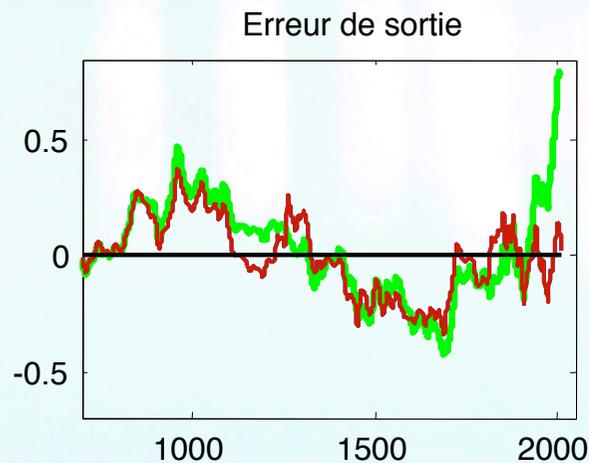
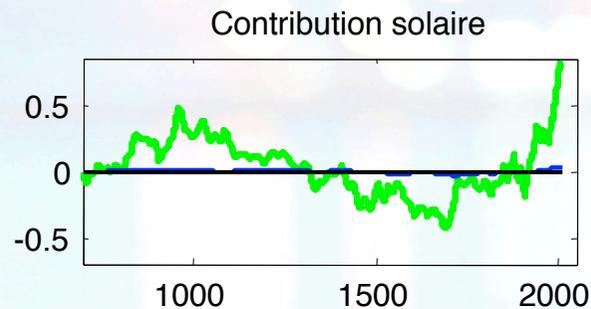
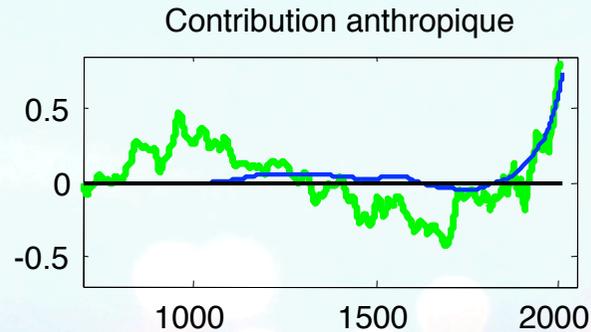
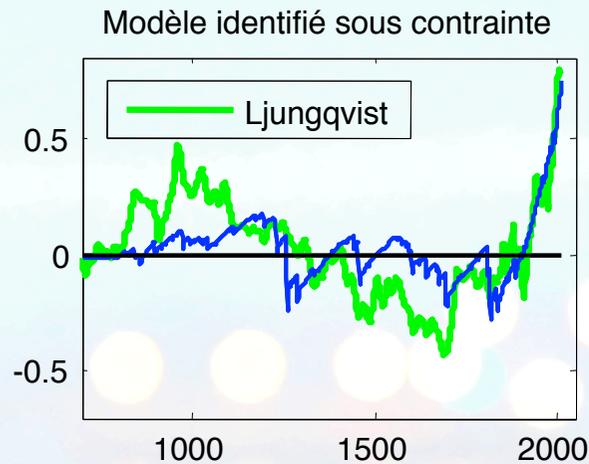
La contribution anthropique est loin d'être majoritaire dans le réchauffement récent.

La contribution naturelle (activité solaire + volcanique + variabilité interne) l'emporte largement.

La sensibilité à l'activité solaire est très supérieure à celle qui résulterait du seul facteur énergétique. Les autres mécanismes sont mal élucidés.

Identifications forcées

Hypothèse 1 : Sensibilité solaire réduite au facteur énergétique

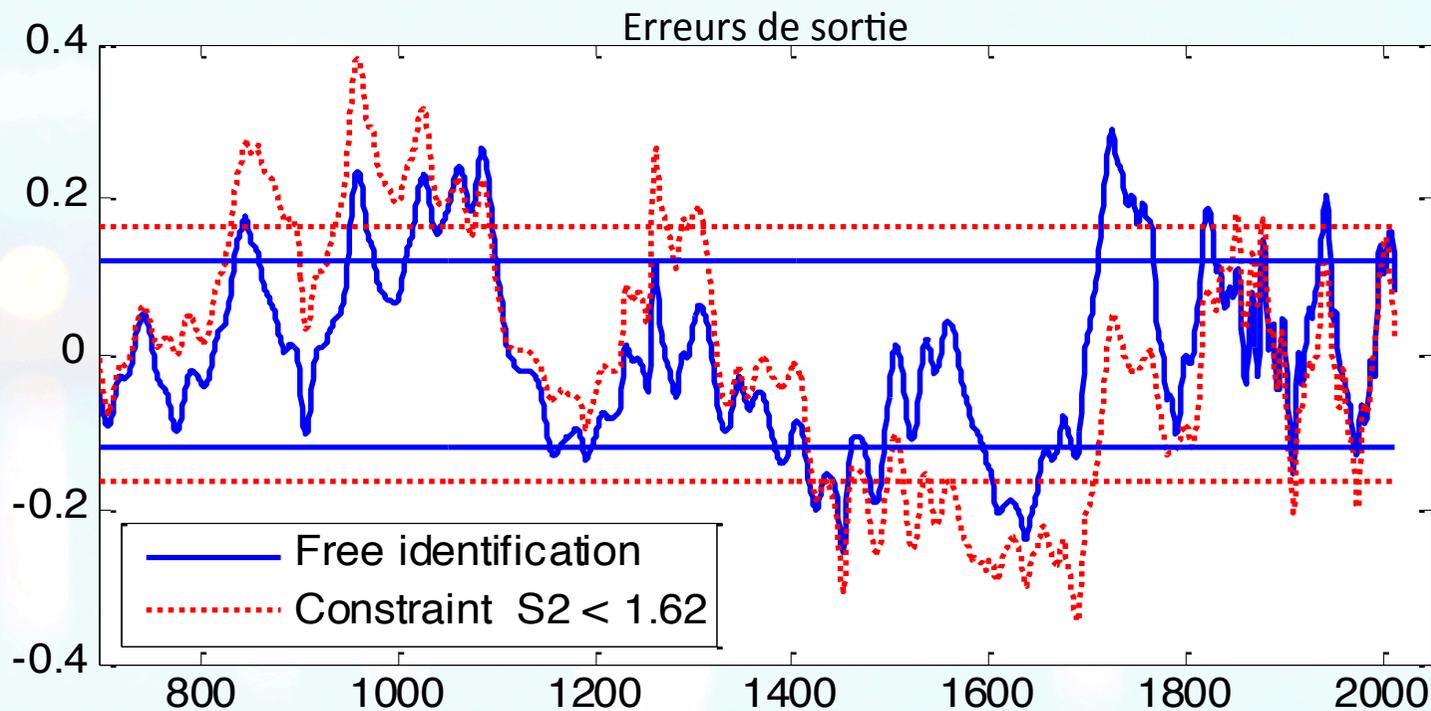


Si on limite la contribution de l'activité solaire au facteur énergétique, tout le réchauffement est mis sur le compte de l'activité humaine...

Mais la période chaude médiévale et le petit âge glaciaire ne sont pas reproduits, même avec une forte contribution de l'activité volcanique.

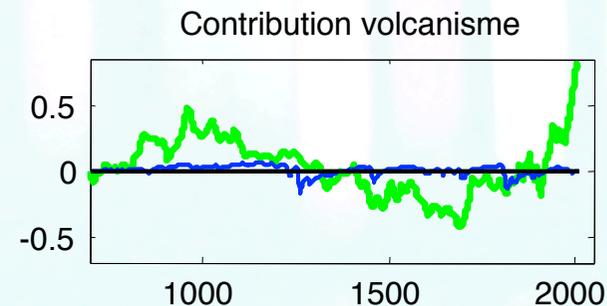
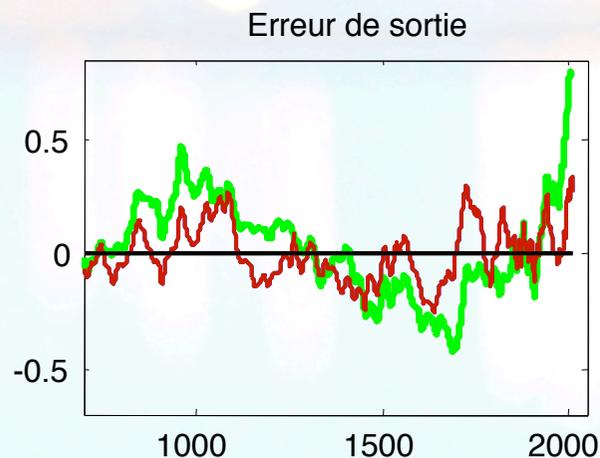
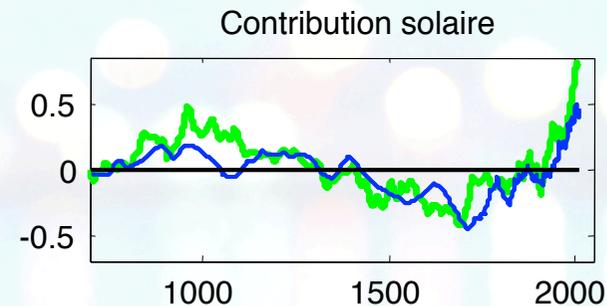
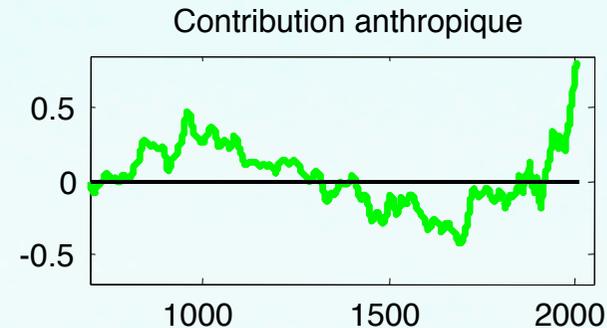
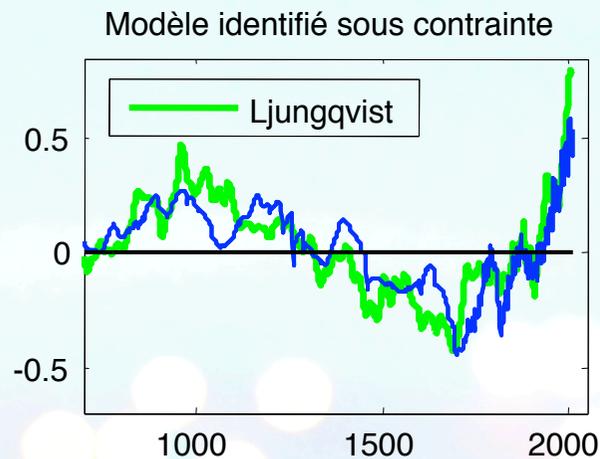
Test d'hypothèse

L'erreur de sortie augmente-t-elle significativement sous l'hypothèse 1 d'une faible sensibilité à l'activité solaire?



Test statistique → L'hypothèse 1 doit être rejetée (à plus de 90 %)

Hypothèse 2 : Sensibilité au CO₂ nulle



L'erreur de sortie **n'augmente pas significativement**
Test statistique → l'hypothèse 2 ne peut pas être rejetée

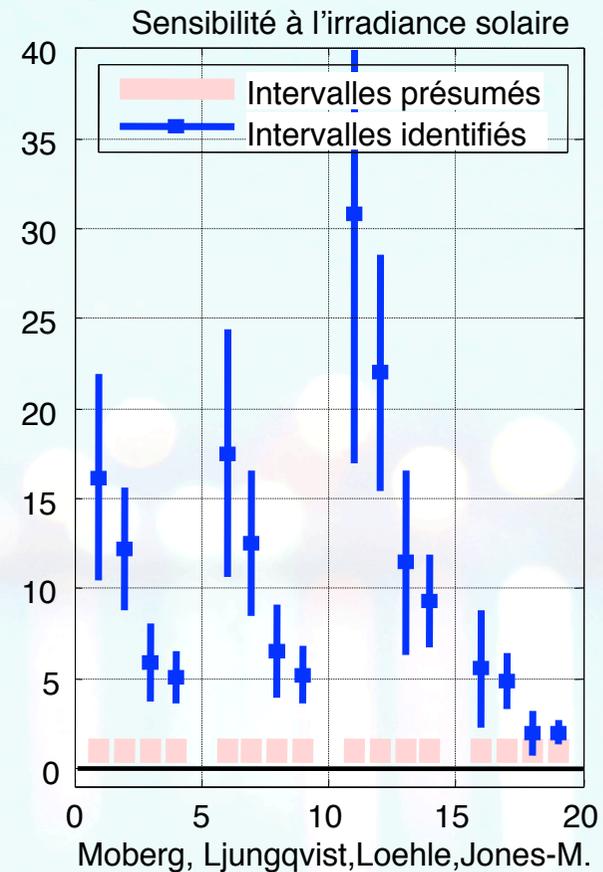
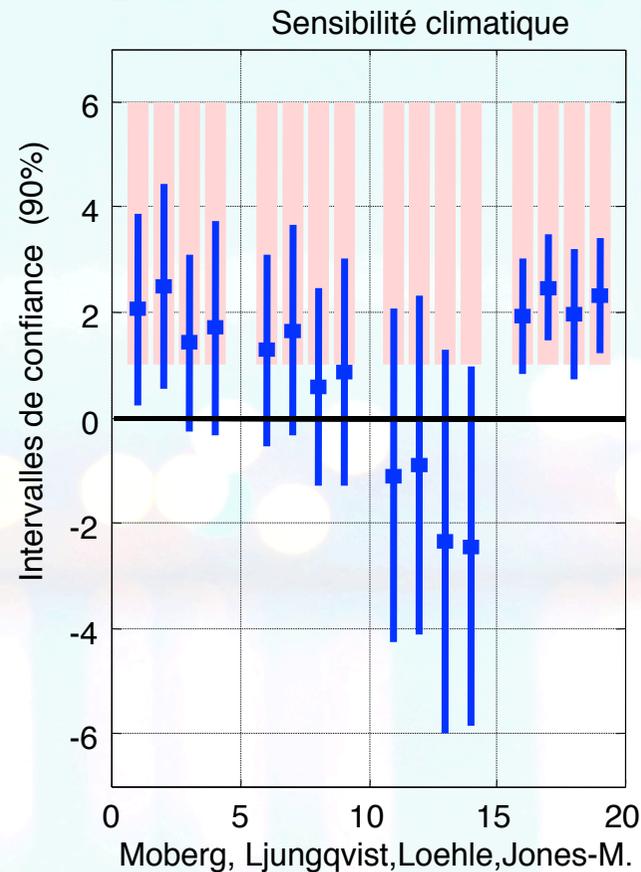
Les conclusions sont tributaires du jeu de données (ici : 6/16)

Si on sélectionne une reconstruction de température « en crose de hockey » (12 à 16/16) les conclusions seront inversées.

➔ On traite systématiquement 16 combinaisons, résultant de quatre reconstructions de température et quatre reconstructions d'irradiance

Résultats d'ensemble (les 16 combinaisons)

Plages paramétriques identifiées



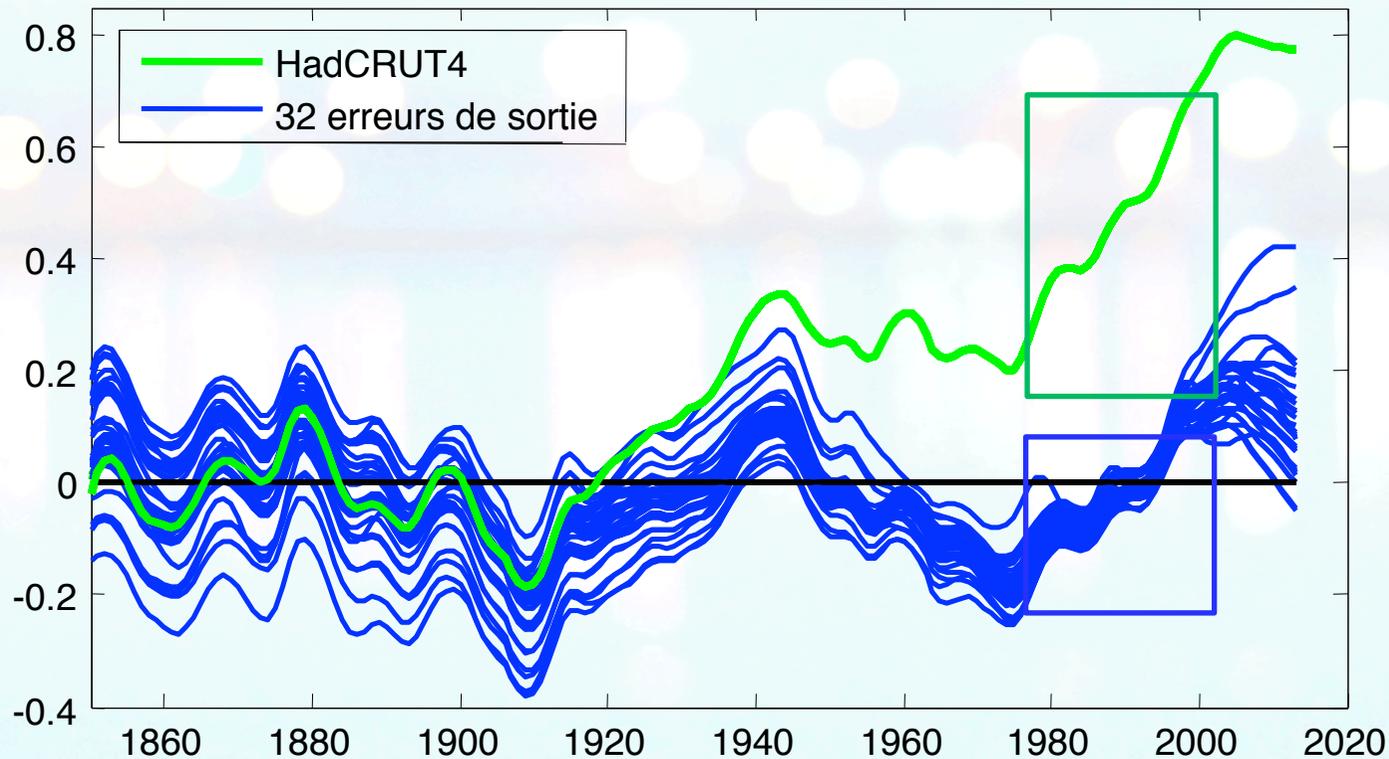
Il n'est pas exclu que la sensibilité anthropique soit insignifiante.

Il est exclu que la sensibilité solaire soit insignifiante.

... sauf si on se limite à la reconstruction de Jones & Mann

Variabilité interne estimée

Même avec les données J&M, et même sous contrainte de faible sensibilité solaire, la plus grande partie du réchauffement 1975-2000 (0.5 °C) est due à la variabilité interne (0.3 °C).



PROJECTIONS (CH. 10 ET 11)

Les **projections** sont des prédictions conditionnées par des scénarios raisonnables pour l'évolution future des entrées causales.

Prédictions à long terme (horizon 2100)

Les projections issues des modèles libres (y compris avec crosse de hockey) parviennent à peine à dépasser la barre des 2 °C au dessus de la température d'équilibre préindustrielle.

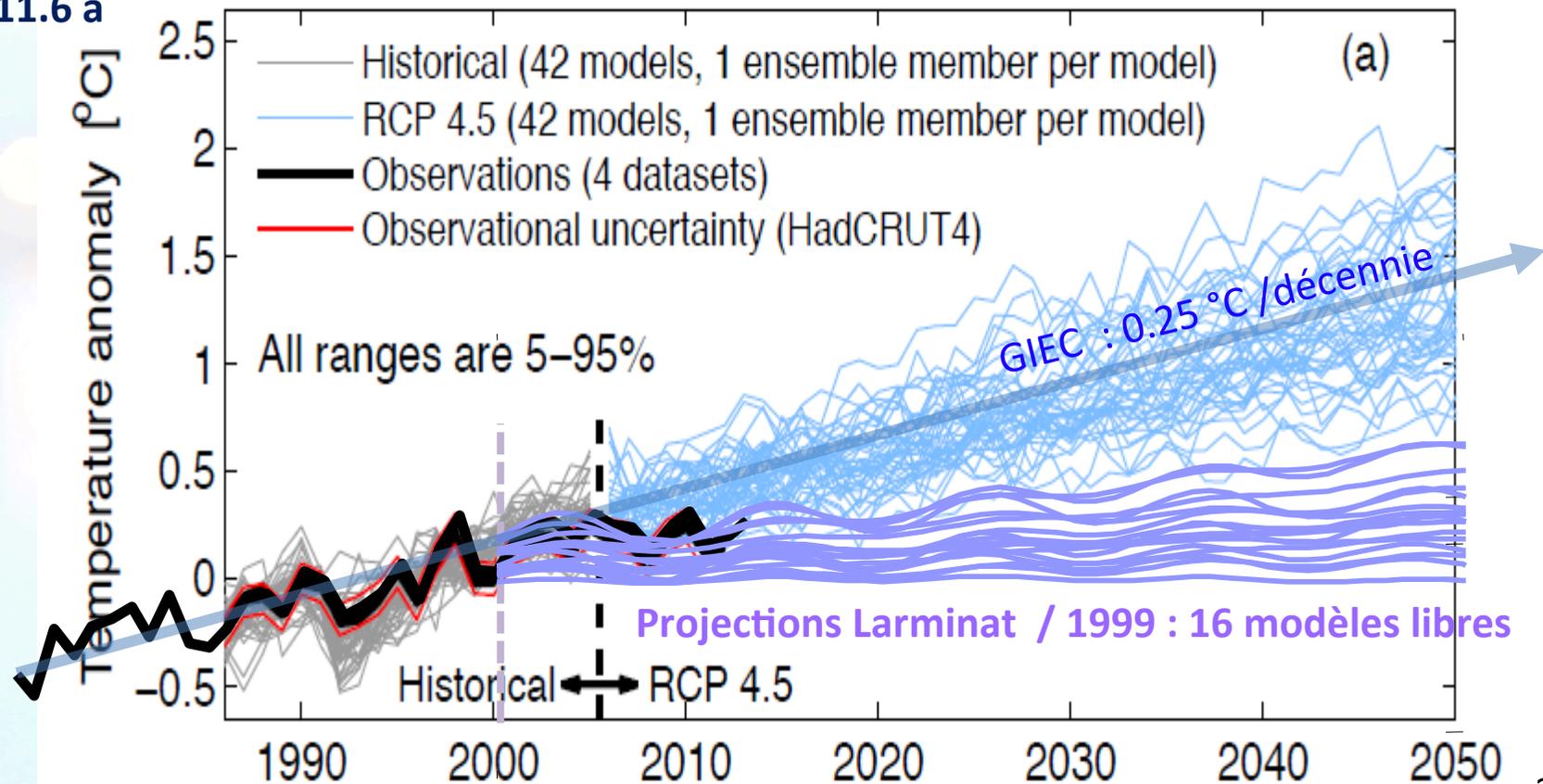
Projections à court terme

Toutes les données postérieures à 1999 sont ignorées :

- pour l'identification des modèles
- pour l'actualisation de l'état des modèles
- Même l'activité solaire est prédite.

AR5 Global mean temperature projections (RCP 4.5), relative to 1986–2005

Fig. 11.6 a



1. Introduction

2. Identification

3. Détection et attribution

4. Conclusions

Détection et attribution

L'association des termes **détection et attribution** ne se réfère pas à un corps de doctrine préexistant. La D&A a été développée par et pour la communauté climatologique en vue d'un objectif déterminé : détecter l'existence d'un changement climatique et l'attribuer à l'action humaine :

Hegerl, G. et al., 2010: **Good practice guidance paper on detection and attribution related to anthropogenic climate change**. [T. F. Stocker, et al. (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland.

Hegerl, G., & Zwiers, F. (2011). **Use of models in detection and attribution of climate change**. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(4), 570-591.

Le chapitre 10 de AR5 est consacré à la D&A..

Bonnes pratiques ?

Single-Step attribution. *Example : Anthropogenic contribution to Area Burnt by Forest Fires in Canada*

Single step, vraiment ?

Anthropogenic → global warming → Forest fires

Multi-Step Attribution. *Example : Impacts of Rising Atmospheric CO2 on Reef-Building Corals*

CO2 atm. → CO2 océanique → coraux.

Confounding Factors

Confounding factors may lead to false conclusions within attribution studies if not properly considered or controlled for.

Justement, le réchauffement n'est-il pas un facteur de confusion ?

CO2 atm. → réchauffement → coraux. Pourquoi pas ?

Une lacune : l'attribution en présence de boucle de réaction (nous dirions l'identification en boucle fermée).

Une technique : « Optimal Fingerprinting »

Fingerprint : empreinte. *Fingerprinting* : ?

Typiquement, une empreinte est la réponse X_i d'une variable simulée par un modèle prédéfini à la variation d'une cause potentielle u_i .

Une optimisation statistique triviale (BLUE) permet de pondérer les différentes empreintes pour obtenir leurs contributions respectives, et déterminer celles auxquelles on peut attribuer effectivement une relation de cause à effet.

En bref :

Simulations → empreintes → régressions → attribution

Succès garanti

Hegerl, G., & al. (2011). **Use of models in detection and attribution of climate change**. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(4), 570-591. :

« **Même pour des scientifiques**, le rôle des observations, de la perception physique et des modèles climatiques dans l'estimation de la **contribution humaine** au récent changement climatique n'est **pas toujours clair** ».

Des inquiétudes ? Au contraire :

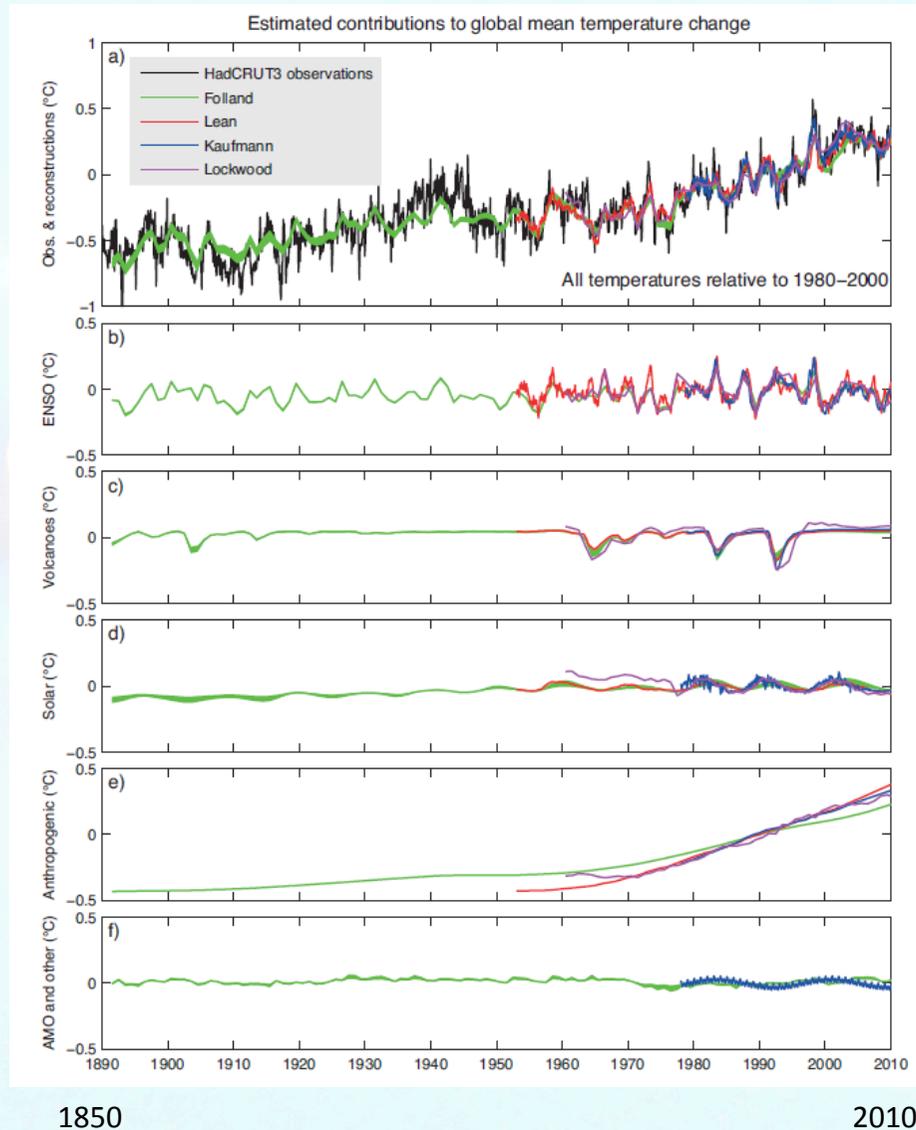
« L'attribution n'exige ni n'implique que chaque aspect de la réponse au facteur causal en question soit correctement simulé ». (AR5, p 873)

« Les incertitudes de modèle ont peu de poids sur l'estimation de la contribution des gaz à effet de serre au réchauffement récent ».

On se rassure : les modèles peuvent être discutables, cela n'empêchera pas l'attribution anthropique d'être valide.

Figure 10.6 du 5^{ème} rapport

(synthèse de 4 publications)



Température globale observée et total des contributions.

Contribution indice ENSO (El Niño South Oscillation)

Activité volcanique

Activité solaire

Activité humaine

(Atlantic Multidecadal Oscillation et autres modes de variabilité)

Bonne pratiques ?

L'évolution de la variabilité interne estimée n'est pas figurée. C'est pourtant un critère d'évaluation capital.

Les périodes d'observation vont de quelques dizaines d'années à 160 ans maximum. C'est très insuffisant pour garantir que la détection n'est pas une fausse alarme.

La contribution humaine évaluée est d'autant plus faible que la période d'observation est longue. Et si on l'allongeait encore ?

Une erreur méthodologique fondamentale

La contribution ENSO est mise sur le même plan que les contributions des forçages externes.

Les indices ENSO et autres résultent de paniers de mesures locales de pression, température, vents et nébulosité. Une combinaison **d'effets** climatiques locaux ne peut en aucun cas constituer une **cause** du climat global.

Il se trouve que les épisodes el Niño permettent d'anticiper le climat global. Ce n'est pas parce que les variations d'un signal précèdent les variations d'un autre que le premier est une cause indépendante pour le second.

Cette confusion entre causes et effets est une **aberration systémique** caractérisée. Elle n'est pas propre seulement au GIEC. Elle ne peut conduire qu'à des conclusions fausses...

Une erreur indétectable

Pour simplifier, imaginons un modèle climatique décomposé en deux sous-systèmes :

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2, u, w_1), \quad x_1 : \text{température globale}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2, u, w_2), \quad x_2 : \text{indice ENSO}$$

u : entrées indépendantes,

w_1, w_2 : perturbations aléatoires.

Oublions la seconde équation et réécrivons la première :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, v, u, w)$$

Le tour est joué : l'indice ENSO noté v , est devenu une entrée.

Le nouveau « modèle » est à la fois parfaitement exact et complètement faux.

L'erreur est indétectable par qui n'est pas systémicien.

Une faute heureuse

O felix culpa quae talem ac tantum meruit habere redemptorem
(El Niño : l'Enfant Jésus, le Sauveur)

AR5, Encadré 10.2 | L'influence du Soleil sur le climat de la Terre :

« Il peut être difficile de discriminer entre le signal de forçage solaire et le signal ENSO » (assertion étayée par 11 références).

➔ Grâce à la confusion cause-effet, on peut attribuer à El Niño ce qui devrait revenir à l'activité solaire.

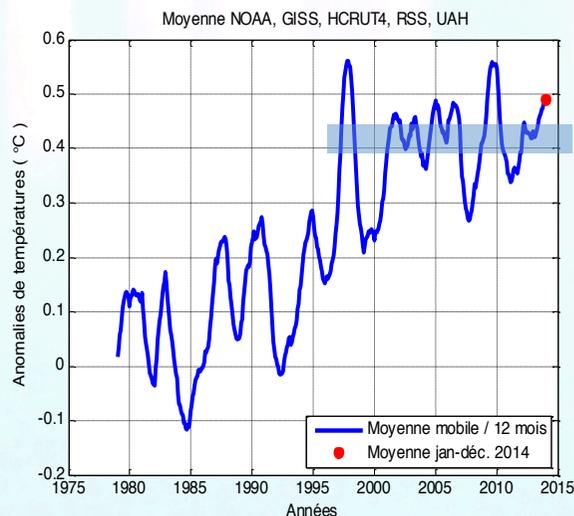
Indispensable El Niño :

(Foster, G., & Rahmstorf, S. (2011). Global temperature evolution 1979–2010. *Environmental Research Letters*, 6(4), 044022.)

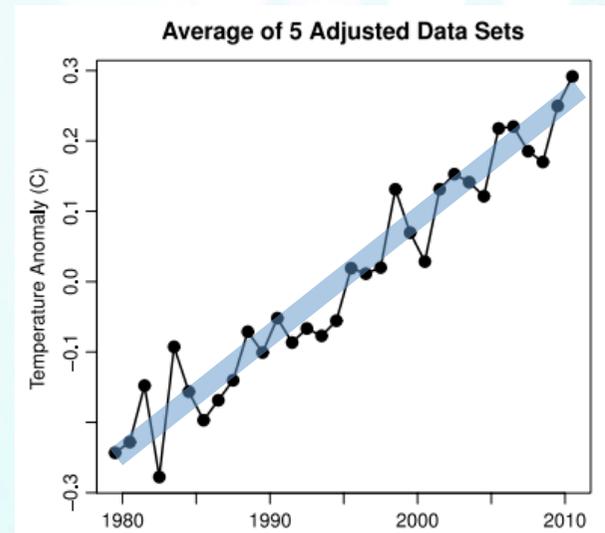
Ou comment escamoter une pause climatique.

1. Sélectionner les observations : mesures au sol, de préférence aux mesures satellitaires qui accentuent la pause.
2. Découvrir et corriger des biais de mesure.
3. Corriger les effets négatifs des causes externes (volcanisme et activité solaire).
4. **Corriger un effet (la pause) par un autre effet (ENSO) !!!**

Avant :



Après :





Bonnes pratiques ?

1. Introduction
2. Identification
3. Détection et attribution

4. Conclusions

Identification, en résumé :

Avec un niveau de confiance de 90 % :

- 1. On ne peut pas rejeter l'hypothèse que la contribution de l'activité humaine au réchauffement récent soit insignifiante.**
- 2. On doit rejeter l'hypothèse d'une contribution insignifiante de l'activité solaire. Avec la variabilité interne, elle constitue la cause principale du réchauffement récent.**

Ces conclusions résultent exclusivement du traitement statistique des observations climatiques, sans faire intervenir aucune connaissance *a priori* quantifiée.

Objections techniques internes

Pauvreté et unicité des données. Impossibilité d'en extraire deux jeux de données, l'un pour l'identification, l'autre pour la validation.

→ L'analyse statistique y supplée comme elle peut.

Hétérogénéité des températures raccordées: continents / océans, hémisphères N / S

→ L'hétérogénéité entre reconstructions est bien supérieure.

Instationnarité des bruits de mesure et perturbations.

→ Une modélisation fine des bruits et perturbations serait souhaitable, mais source d'arbitraire et de fragilité.

Etc.

Toutes les objections constructives sont bienvenues. Tels qu'ils sont, les calculs de probabilités et test d'hypothèse sont discutables. Ils ont le mérite d'exister. Ce ne sont pas des jugements d'expert.

Pour une expertise de mes travaux, les programmes sont sur le Web :

http://www.iste.co.uk/fr/delarminat_zin

Objections externes

- Les modèles physiques ?
- Les plages proposées par le GIEC pour la sensibilité climatique ?
- Une sensibilité solaire inexplicable par le seul facteur énergétique ?
- Les preuves expérimentales directe de l'origine humaine du réchauffement ?

En revanche :

- Le pouvoir explicatif et prédictif à court terme des modèles du Giec est inexistant.
- L'attribution anthropique exige la négation de la période chaude médiévale et du petit âge glaciaire.

Objection par la D&A

Des dizaines d'auteurs publient sur le thème de la détection et attribution. Ils se reviewent entre eux, en vase clos.

Aucun ne se soucie de la confusion cause et effet.

Pas un ne parle d'identification. Ni dans les 1550 pages du rapport complet du GIEC, ni dans aucune des 9200 publications recensées.

- Ignorance pure et simple ?
- Échec, faute de savoir faire ?
- Conclusions prévisibles incompatibles avec la mission du GIEC ?

Argument d'autorité ?

Consensus ?

Ce ne sont pas des arguments scientifiques.

Confiance ?

Doit-on faire confiance aux leaders du GIEC ?



Déclaration de **Stephen H. Schneider**, fondateur et éditeur du prestigieux journal *Climatic Change*, auteur ou co-auteur de plus de 450 publications scientifiques, rédacteur coordinateur du troisième rapport du groupe II du GIEC, **rédacteur de recommandations aux auteurs des rapports du GIEC.**

*« D'un côté, en tant que scientifiques nous sommes tenus à l'éthique scientifique...
...D'un autre côté, nous aimerions réduire les risques d'un changement climatique
potentiellement catastrophique.*

*Pour cela, il nous faut frapper l'imagination du public... un maximum de couverture
médiatique... des scénarios effrayants... des déclarations simplifiées et dramatiques
... éviter de mentionner le moindre doute.*

***Chacun de nous doit décider quel est le juste équilibre entre être efficace et être
honnête ».***

La [citation](#) complète est plus édifiante encore que les extraits !

Un [prix annuel](#) de 15 000 \$ a été créé en l'honneur de **Stephen H. Schneider** après sa mort (2010), pour récompenser les meilleures communications grand public sur le changement climatique.

- Le GIEC fonctionne en vase clos : il a fallu l'intervention de statisticiens extérieurs indépendants pour disqualifier le *hockey stick graph*.
- La compréhension profonde du système climatique relève autant de la théorie des systèmes que de la physique.
- Ça n'est pas aux automaticiens en tant que tels de faire avancer la science climatique, mais leur autorité en « *Systems Science* » est irremplaçable.

Appel à expertise

La communauté MACS possède l'expertise et l'indépendance nécessaire pour une évaluation sérieuse des modèles climatiques et de leurs implications.