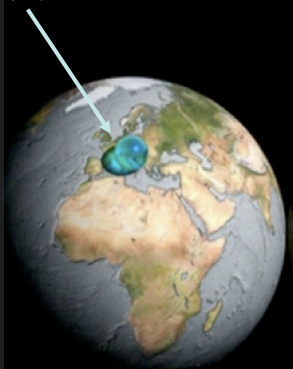
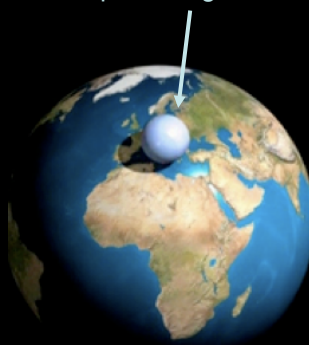


Représentation de la  
quantité totale de l'air  
présent dans l'atmosphère  
(comprimé à la pression  
atmosphérique)



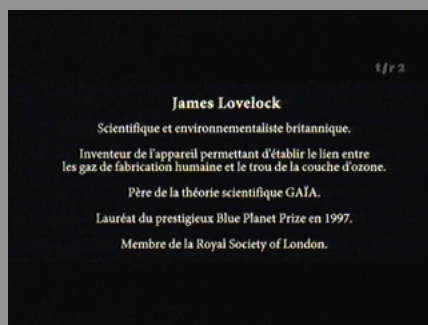
Représentation de la  
quantité totale de l'eau  
présente sur Terre  
sous forme solide,  
liquide ou gazeuse



Bienvenue à bord !!

## Le climat dans tous ses états !

L'évolution climatique ... où est le problème ? La Terre chauffe ... et alors ? )



Extrait du film documentaire « Nous resterons sur Terre », d'Olivier Bourgeois et de Pierre Barougier

1. Le climat, comment ça marche ?
2. Que se passe-t-il au cours des 2 derniers siècles ?
3. Pourquoi l'acidification des océans est un problème ?
4. Quelles solutions pour diminuer nos rejets de gaz carbonique ?

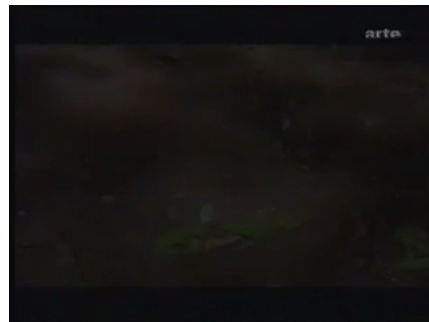
## 1<sup>ère</sup> partie : Le climat, comment ça marche?

Pour faire simple, on peut dire que :

Le moteur du climat, c'est l'énergie solaire qui arrive sur la Terre.

Cette énergie chauffe la surface de la Terre de façon très inégale en fonction de la couverture nuageuse, de la latitude et de l'albedo.

Ce sont les différences de température entre l'air et le sol et entre l'air et la surface des océans qui sont à l'origine de tous les mouvements des masses d'air, des variations de pression et de l'évaporation de l'eau.

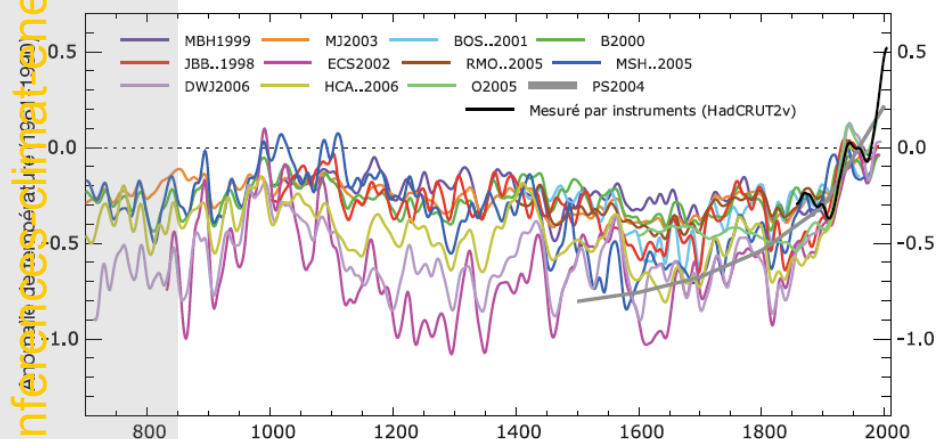


Extraits tirés d'un documentaire d'Yves Billy : « Luft Verschmutzung zu verkaufen »  
Documentaire présenté au cours de l'émission Thema diffusée sur Arte le 3 mai 2005

J.C. Keller

## L'évolution des températures au cours du dernier millénaire

### RECONSTITUTIONS DES TEMPÉRATURES DE L'HÉMISPHÈRE NORD



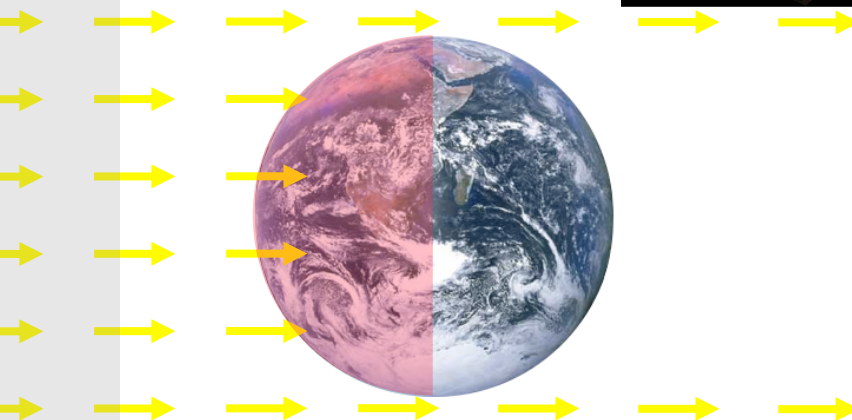
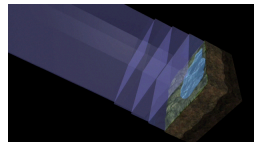
[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/tssts-3-5.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/tssts-3-5.html)

J.C. Keller

## La Terre reçoit de l'énergie solaire !

La Terre intercepte l'énergie solaire et sa surface chauffe.

Une partie seulement de cette énergie atteint la surface.

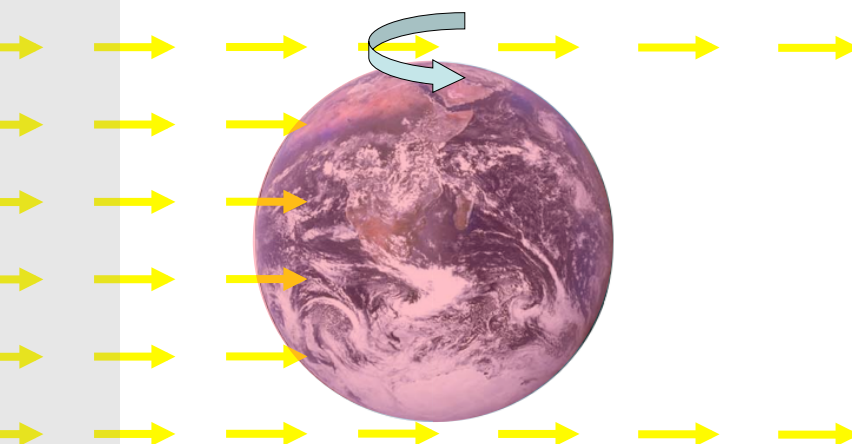


[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)

J.C. Keller

## La Terre tourne sur elle-même !

La Terre tourne sur elle-même donc elle chauffe sur toute sa surface.



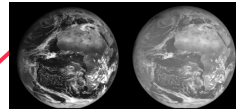
[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)

J.C. Keller

## La Terre émet des rayons infrarouges !

- La Terre émet un rayonnement IR : c'est la seule possibilité pour elle d'évacuer de l'énergie !

Ce rayonnement est visible depuis l'espace ! Voici une image en IR prise par un satellite MSG (Meteosat Second Generation).



[http://www.esa.int/esaMI/MSG/SEMMDPKNZCIE\\_1.html](http://www.esa.int/esaMI/MSG/SEMMDPKNZCIE_1.html)

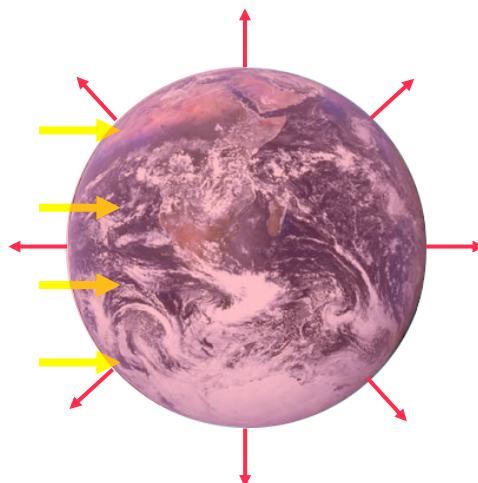


[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)

J.C. Keller

## Le bilan de l'énergie rayonnante !

La Terre sera en équilibre thermique si le rayonnement entrant est égal au rayonnement sortant



[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)

J.C. Keller



## Qu'est-ce qui modifie ce bilan ?

La Terre sera en équilibre thermique si le rayonnement entrant est égal au rayonnement sortant



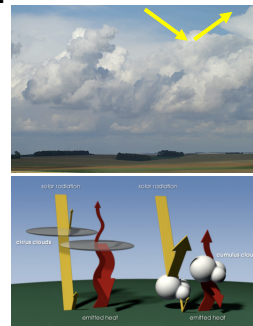
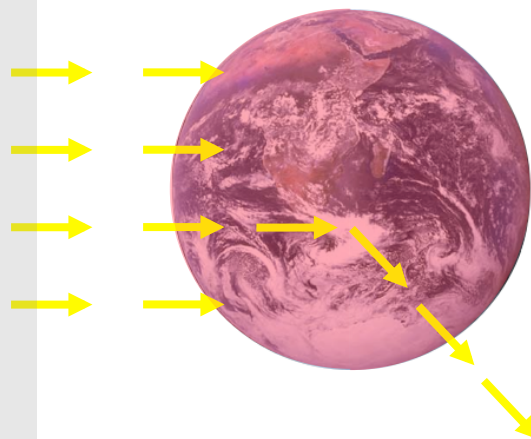
[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)

J.C. Keller

## La couverture nuageuse !

Les nuages réfléchissent une partie de l'énergie solaire vers l'espace.

**La couverture nuageuse a donc pour effet de refroidir la Terre !**



<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/DelicateBalance/>

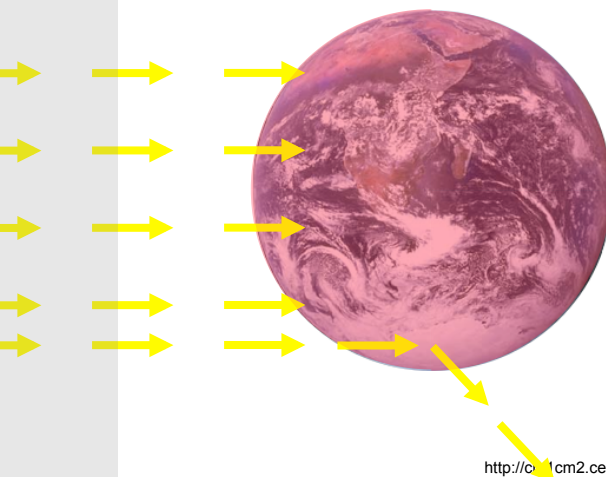
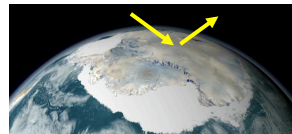
[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)

J.C. Keller

## L'albédo de la surface terrestre !

La neige et la glace réfléchissent une partie de l'énergie solaire vers l'espace.

**La présence des calottes polaires et des glaciers a donc pour effet de refroidir la Terre !**

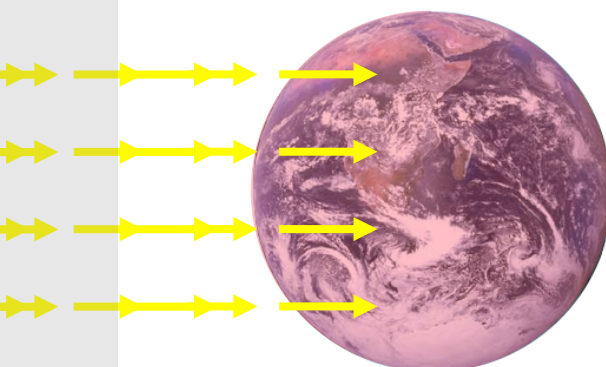
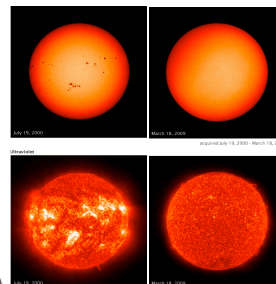


[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)

J.C. Keller

## La variation de l'énergie solaire !

L'énergie envoyée par le soleil varie d'environ 1 à 2 pour mille sur un cycle d'environ 11 ans.



[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)  
<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=37575&src=goa-iotd>

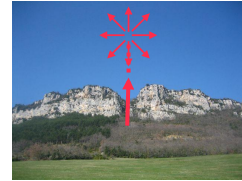
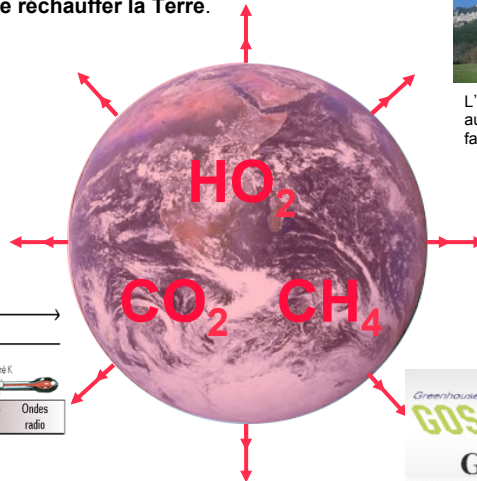
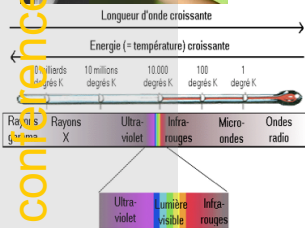
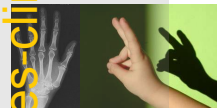
J.C. Keller

## Les gaz à effet de serre !

Les gaz à effet de serre agissent sur l'énergie IR qui est émise par la Terre en direction de l'espace.

**La présence de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a donc pour effet de réchauffer la Terre.**

Un exemple plus familier :  
L'air est transparent aux rayons X mais fait écran aux rayons de la lumière !



L'atmosphère est transparente aux rayons de la lumière mais fait écran aux infrarouges !



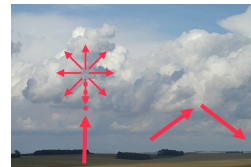
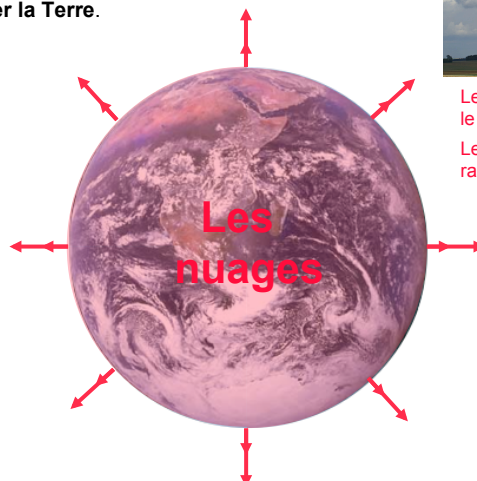
[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)

J.C. Keller

## Encore les nuages !

Les nuages agissent sur l'énergie IR qui est émise par la Terre en direction de l'espace.

**La présence des nuages dans l'atmosphère a donc pour effet de réchauffer la Terre.**



Les nuages réfléchissent le rayonnement IR

Les nuages absorbent le rayonnement IR

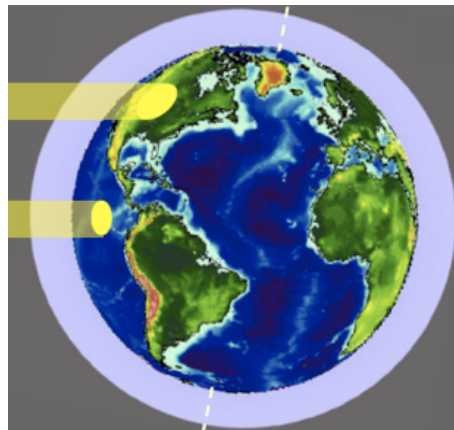
[http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers\\_fichiers/terre.jpg](http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/univers_fichiers/terre.jpg)

J.C. Keller

## La Terre est sphérique !

La Terre reçoit plus d'énergie par mètre carré dans les zones équatoriales et tropicales que vers les pôles.

Cela est à l'origine des grands courants atmosphériques et océaniques.



<http://www.sauvonsleclimat.org/new/spip/spip.php?auteur32>

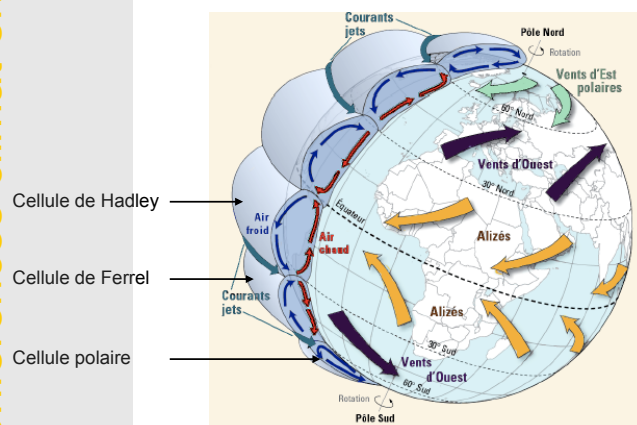
J.C. Keller

## Les courants atmosphériques !

Les grands courants atmosphériques transportent de la chaleur en direction des pôles.

**Ces courants n'influencent pas directement le bilan énergétique global de la Terre !**

**Par contre, ils ont un effet indirect par la formation des nuages, ainsi que par les échanges de chaleur, de vapeur d'eau et de gaz carbonique avec les océans !**



<http://www.sauvonsleclimat.org/new/spip/spip.php?auteur32>

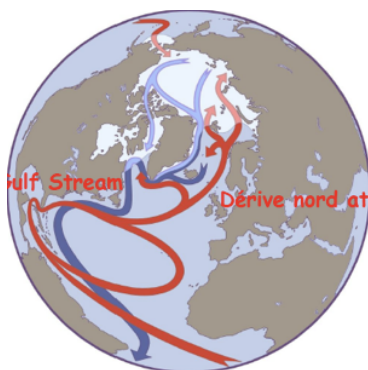
J.C. Keller

## Les courants océaniques !

Les grands courants océaniques transportent de la chaleur en direction des pôles.

**Ces courants n'influencent pas directement le bilan énergétique global de la Terre !**

**Par contre, ils ont un effet indirect par les échanges avec l'atmosphère, échanges de chaleur, de vapeur d'eau et de gaz carbonique !**

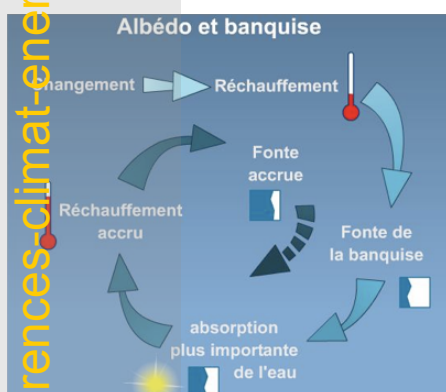


<http://www.sauvonsleclimat.org/new/spip/spip.php?auteur32>

J.C. Keller

## Les boucles de rétroaction viennent tout compliquer !

Exemple d'un mécanisme qui amplifie la variation de départ :

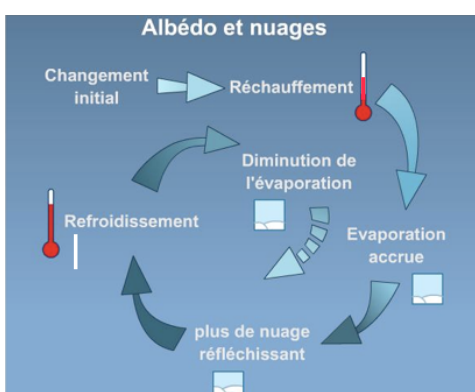


Source: CD de la Fondation Polaire Internationale, ©2003

Illustration par la position d'une bille :



Exemple d'un mécanisme qui atténue la variation de départ :



Source: CD de la Fondation Polaire Internationale, ©2003

Illustration par la position d'une bille :



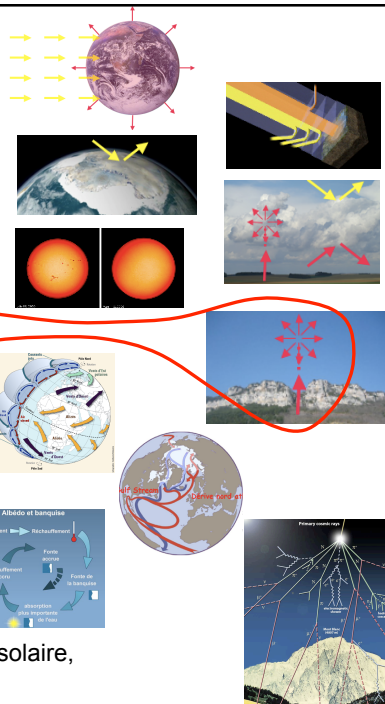
J.C. Keller

## Résumons !

- Les 2 flux d'énergie rayonnante doivent s'équilibrer, sinon la Terre chauffe ou refroidit.
- L'atmosphère agit sur le flux entrant.
- La nature du sol agit sur le flux entrant.
- Les nuages agissent sur le flux entrant et sur le flux sortant.
- L'intensité du rayonnement solaire entrant varie.

**Les gaz à effet de serre agissent sur le flux sortant.**

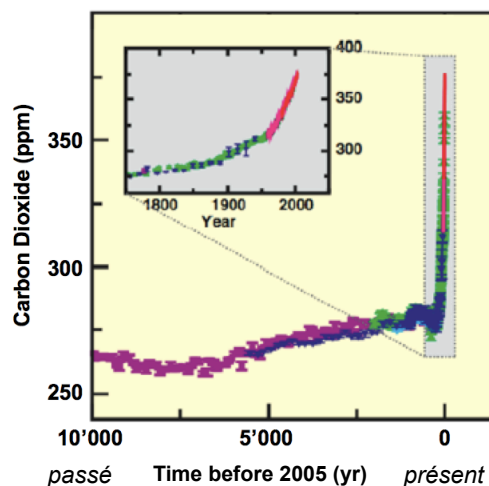
- L'atmosphère redistribue la chaleur et a un effet indirect (échanges  $H_2O + CO_2$  avec océans + formation des nuages)
- Les océans redistribuent la chaleur et ont un effet indirect (échanges  $H_2O + CO_2$  avec atmosphère)
- Les boucles de rétroaction positives et négatives compliquent tout.
- Et on soupçonne que les rayons cosmiques, qui eux-mêmes dépendent du flux solaire, influencent la formation des nuages !



J.C. Keller

## 2<sup>ème</sup> partie : Que se passe-t-il au cours des 2 derniers siècles !

La concentration de gaz carbonique atmosphérique a considérablement augmenté au cours des 2 derniers siècles !



Source : IPCC, Working Group I: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers  
[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/figure-spm-1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/figure-spm-1.html)

J.C. Keller



## Nos rejets de CO<sub>2</sub> perturbent l'équilibre thermique de la Terre

- La diminution des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est un des grands enjeux planétaires du XXI<sup>ème</sup> siècle !

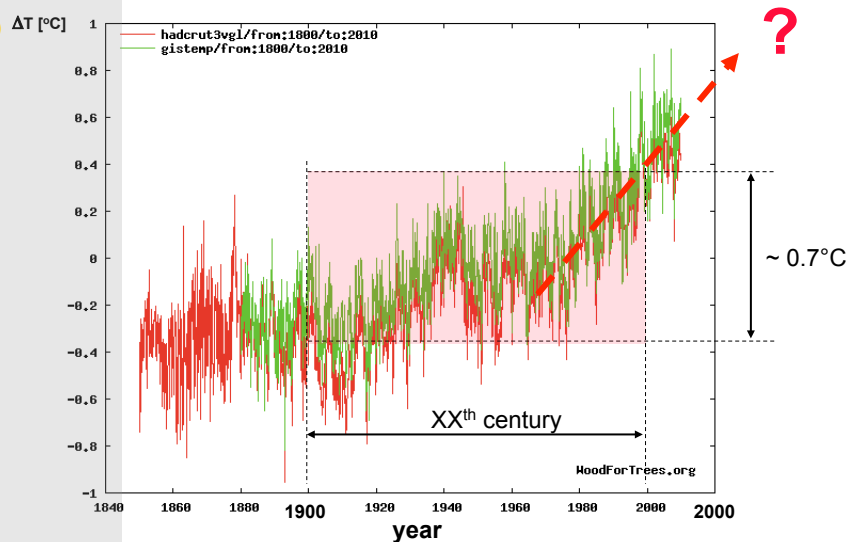


Extraits tirés d'un documentaire de Mark Verkerk : « Climat, agir sans attendre »  
Documentaire présenté au cours de l'émission Thema diffusée sur Arte le 3 mai 2005

J.C. Keller

## Conséquence de cette augmentation de CO<sub>2</sub>

- La température augmente à cause de l'effet de serre !



J.C. Keller

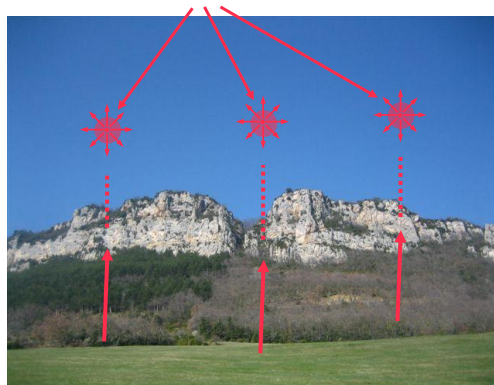


## Qu'est-ce que l'effet de serre ?

- L'atmosphère est transparente à la lumière visible, mais partiellement transparente aux rayons infrarouges !  
Les molécules des gaz à effet de serre absorbent les photons des rayons infrarouges.

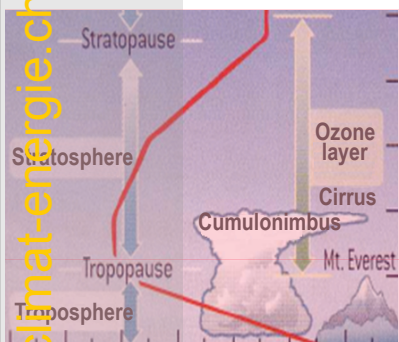
Et maintenant la question est :

« Que devient l'énergie qui est absorbée par ces molécules ? »



J.C. Keller

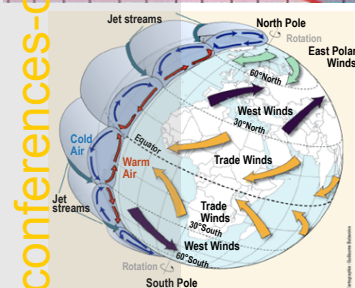
## Comment fonctionne l'effet de serre ?



L'énergie infrarouge est absorbée puis **réémise sous forme d'énergie infrarouge**.

Cette réémission se fait dans toutes les directions, donc aussi vers le bas !

L'énergie infrarouge est absorbée et **convertie en chaleur**



<http://www.sauvonsleclimat.org/new/spip/spip.php?auteur32>

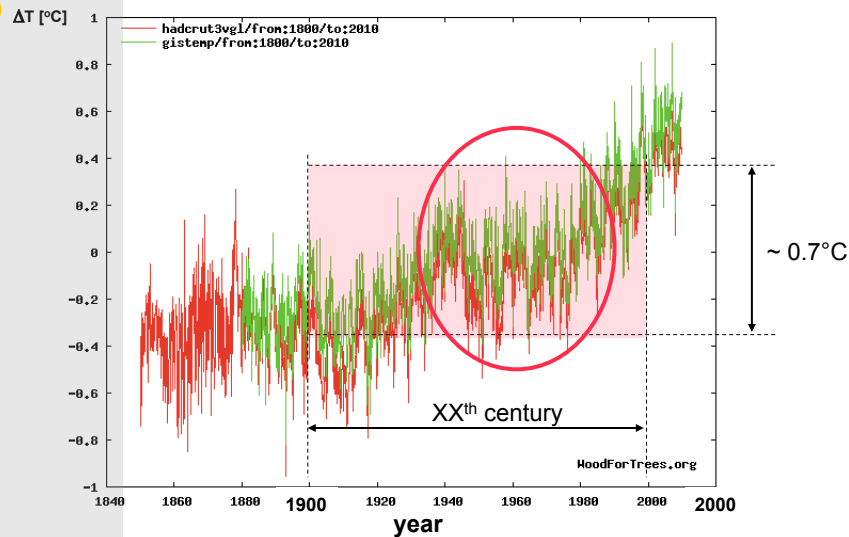
J.C. Keller

« Et que devient cette chaleur ? »

Au sein de la troposphère, il y a de grandes cellules de convection qui transfèrent une partie de cette chaleur vers le sol, ainsi que vers les hautes latitudes en direction des pôles.

## Explication de la stagnation des températures entre 1940 et 1980

La température moyenne augmente avec une grosse anomalie entre 1940 et 1980 !



J.C. Keller

## Effet des explosions atomiques dans l'atmosphère

Il y a eu un obscurcissement planétaire provoqué par les poussières des bombes de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale, puis par les essais nucléaires atmosphériques.

A propos des essais nucléaires :

On estime que 504 tests nucléaires atmosphériques ont été effectués entre 1945 et 1980 (date du dernier test de ce type par la Chine) pour une puissance cumulée de 479 mégatonnes (soit l'équivalent de 30'000 Hiroshima). Les essais de surface ont été bannis par un traité international de 1963 (LTBT).

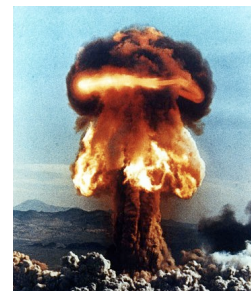
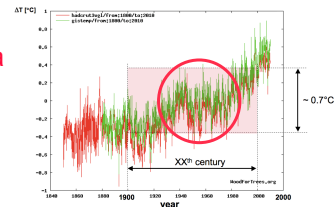
En moyenne, cela représente 1,25 essais par mois (ou bien 2,3 Hiroshima par jour) pendant 35 ans !!

Référence :

Extrait du BE Etats-Unis N°18 du 19 janvier 2006

<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/31693.htm>

Les Etats-Unis ont arrêté leurs essais nucléaires dans l'atmosphère en 1954, la Russie en 1961, et la France en 1974 !

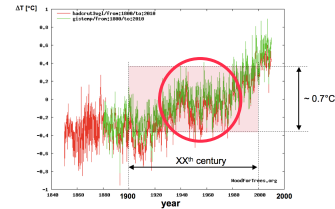


Référence : The role of atmospheric nuclear explosions on the stagnation of global warming in the mid 20th century  
Yoshiaki Fujii, publié le 19/1/2011 sur Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial physics

J.C. Keller

## Obscurcissement dû aux aérosols présents dans l'atmosphère

David Stern a étudié la présence d'aérosols à base de soufre dans l'atmosphère de 1850 à 2000 (article « Global sulfur emissions from 1850 to 2000 » paru dans Chemosphere, volume 58, janvier 2005, pages 163-175). Ces aérosols sont dus à des émissions naturelles (volcans) et anthropiques (combustion du charbon).



Il a constaté qu'entre 1945 et 1970, ces émissions, principalement d'origine anthropiques, ont fortement augmenté et cela plus dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud.

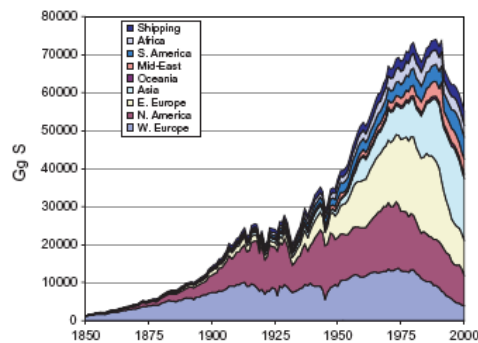


Fig. 3. Global and regional sulfur emissions 1850–2000.

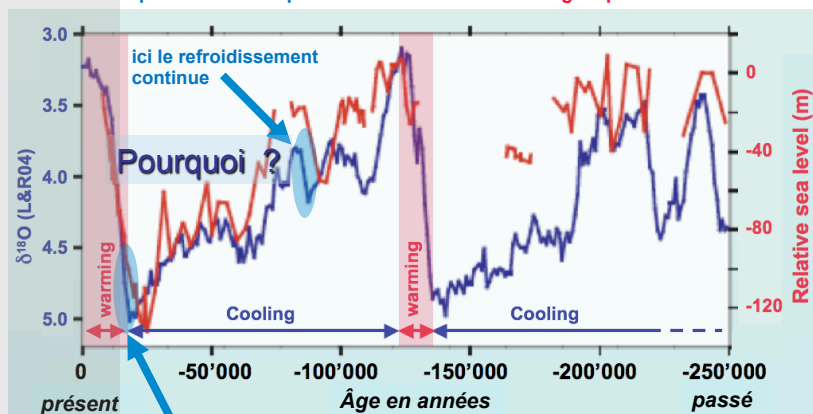
J.C. Keller

## Nous pouvons apprendre du passé !

Dans le passé, l'effet de serre a joué un rôle primordial durant les périodes de réchauffement !

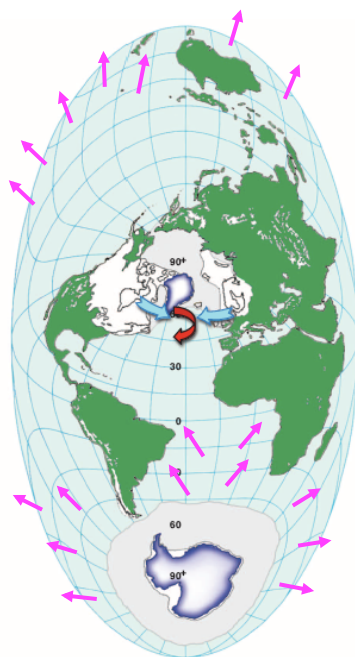
La courbe bleue représente les températures

La courbe rouge représente le niveau des océans



Reference: The Last Glaciation Termination  
G.H. Denton, and al.  
Science 328, 1652 (2010)

J.C. Keller



- De grandes quantités de gaz carbonique dissout dans les eaux sont relâchées dans l'atmosphère.
- Cela entraîne une augmentation importante des températures par effet de serre.

Reference :  
**The Last Glaciation Termination**  
 G.H. Denton, and al.  
 Science 328, 1652 (2010);  
 DOI: 10.1126/Science.1184119

J.C. Keller

## Les conséquences du réchauffement climatique

- Au cours de ces 100 dernières années, on a pu observer des changements dus au réchauffement climatique.



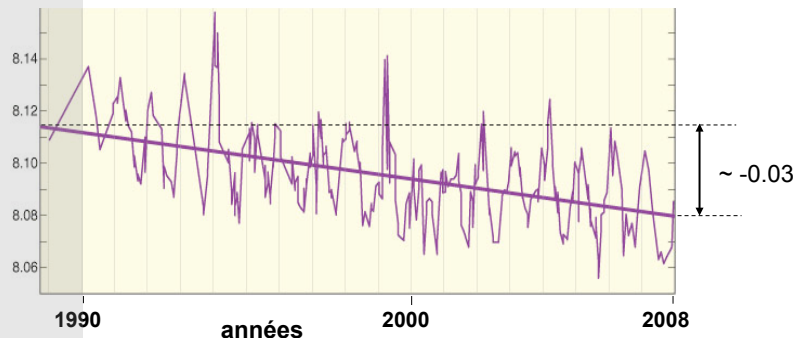
Extraits du document « Quel avenir pour la Terre? » diffusé sur Planète le 22 avril 2007 (HBO® Original Programming).

J.C. Keller

### 3<sup>ème</sup> partie : Pourquoi l'acidification des océans est un problème ?

- Une partie du gaz carbonique présent dans l'atmosphère se dissout dans les eaux de surface des océans.
- Cette dissolution entraîne une augmentation de l'acidité des eaux. (rappel : lorsque le pH décroît, le niveau d'acidité augmente).

pH de l'eau de surface des océans (station Aloha située dans le centre de l'océan pacifique nord)



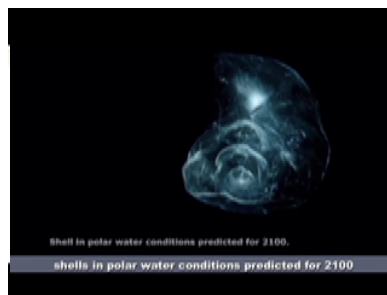
<http://www.ocean-acidification.net/>  
<http://scentofpine.org/gw101-4/>

J.C. Keller

### Cette augmentation de l'acidité des eaux est un problème très sérieux !

- Lorsque l'acidité augmente, la concentration en ions carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) diminue.
- Cela pourrait avoir de graves conséquences sur les coquilles de certains organismes marins, qui contiennent de l'aragonite (le calcaire  $\text{CaCO}_3$  a 2 formes cristallines l'aragonite et la calcite) !
- Et si la concentration des ions  $\text{CO}_3^{2-}$  devient inférieure à **66  $\mu\text{moles par kg}$** , l'eau n'est plus saturée en aragonite et celle-ci devient soluble dans l'eau.
- Or l'aragonite se trouve dans les coquilles de la plupart des mollusques et des ptéropodes (sorte de petits escargots planctoniques).

Exemple : Le ptéropode *Limacina helicina* vivant en Arctique- nourriture pour baleine (taille environ 1 cm)

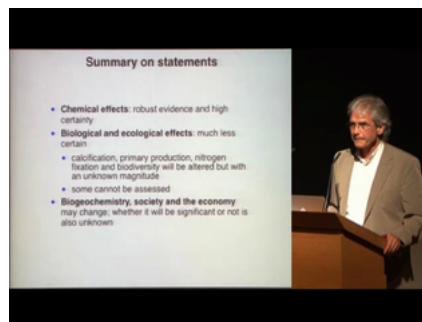
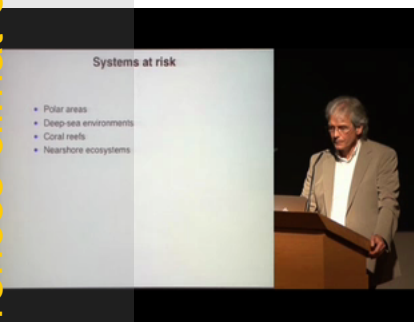
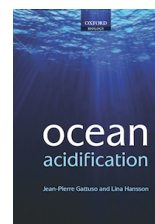


Source: ACID TEST, the global challenge of ocean acidification, A Natural Resources Defence Council Production

J.C. Keller

## Écoutons un spécialiste !

Jean-Pierre Gattuso est directeur de recherche au laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer. Il vient de publier, avec Lina Hansson, un livre sur l'acidification des océans.



Extrait d'une conférence donnée par Jean-Pierre Gattuso dans le cadre d'un séminaire organisé par la chaire du collège de France "Evolution du climat et de l'océan", le 27 mai 2011 à Paris

Téléchargeable sur :

[http://www.college-de-france.fr/default/EN/all/evo\\_cli/Seminaire\\_du\\_27\\_mai\\_2011\\_Lo\\_4.htm](http://www.college-de-france.fr/default/EN/all/evo_cli/Seminaire_du_27_mai_2011_Lo_4.htm)

J.C. Keller

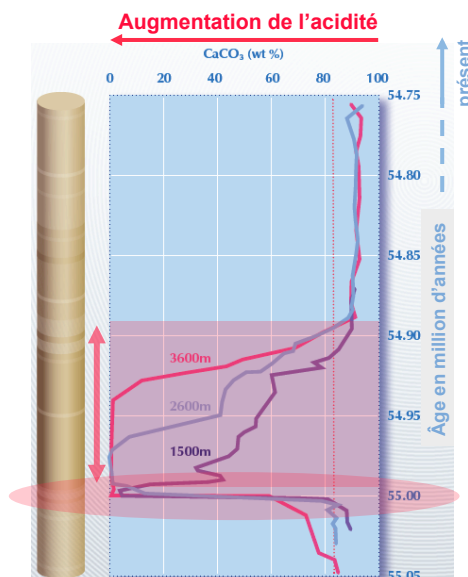
## Que peut-on apprendre du passé ?

Il y a 55 millions d'années, le niveau d'acidité des eaux a augmenté très rapidement (en quelques centaines d'années seulement).

Plus de 100'000 ans ont été nécessaire pour retrouver les conditions antérieures.

avec pour résultat :

la dernière extinction massive d'espèces vivantes !



A Summary for Policymakers from the Second Symposium on the Ocean in a High-CO<sub>2</sub> World  
[www.ocean-acidification.net](http://www.ocean-acidification.net)

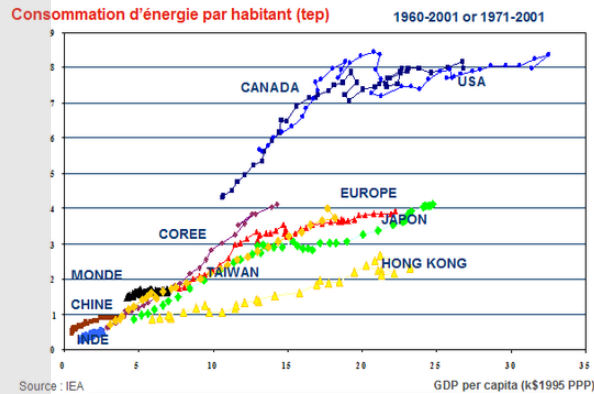
J.C. Keller



## 4<sup>ème</sup> partie : Nous consommons trop d'énergie fossiles !

- Le PIB par habitant dépend de l'énergie à disposition par habitant !

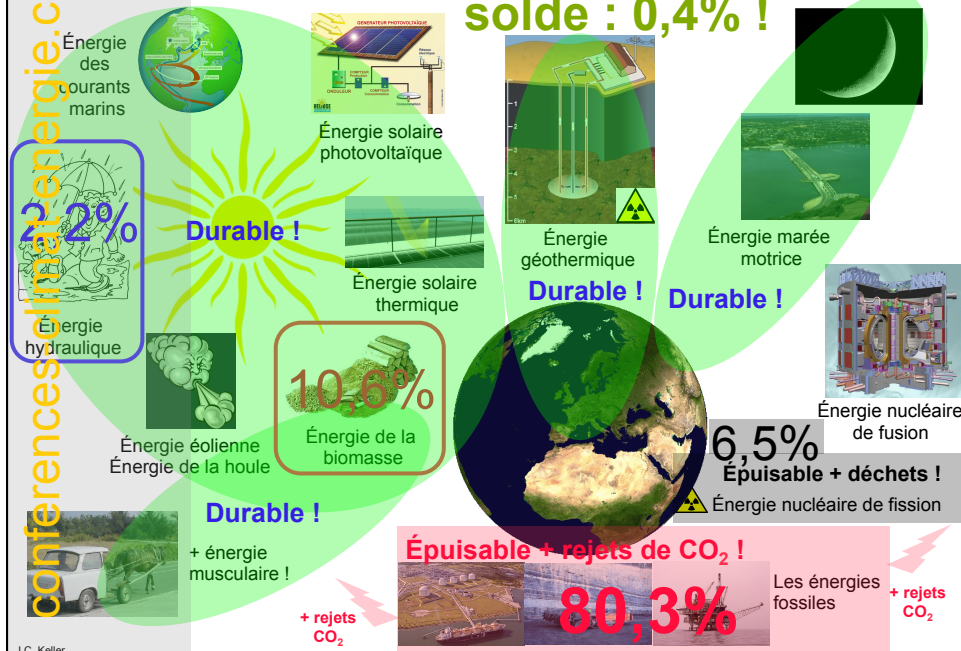
### Le développement est ancré sur une croissance des besoins énergétiques



Source : conférence donnée à Lyon le 24 février 2010 par J.F Minster, directeur scientifique chez Total  
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-energies-futur-JF-Minster.xml>

## Notre consommation actuelle n'est pas durable !

**solde : 0,4% !**





## Alors comment faire ?

- L'équation de Kaya permet de comprendre de quoi dépendent nos rejets de CO<sub>2</sub> :

Si on veut diminuer ce terme

$$CO_2 = \frac{CO_2}{\text{énergie}} \cdot \frac{\text{énergie}}{PIB} \cdot \frac{PIB}{\text{population}} \cdot \text{population}$$

Alors il faut diminuer le produit de ces 4 termes

Ce terme traduit le contenu en CO<sub>2</sub> de l'énergie consommée. Il est possible de le diminuer grâce :

- la production d'électricité sans charbon
- la séquestration du CO<sub>2</sub>
- aux énergies renouvelables
- à l'efficacité énergétique

Ce terme est un indicateur de l'intensité énergétique de l'économie. Ce terme a diminué d'environ 30% au cours des 35 dernières années.

Ce terme est un indicateur de la croissance (production par personne). Dans tous les pays, on cherche à le faire croître !

Les démographes le disent, la population mondiale continuera à croître dans les 20 prochaines années !

J.C. Keller

## A propos d'efficacité énergétique

- L'hôtel Muottas Muragl à Saint-Moritz produit plus d'énergie qu'il n'en consomme:

**Öffnung am 18. Dezember 2010**

• 30% größere beheizte Nutzfläche (EBF)  
• 34% Reduktion des Gesamtenergiebedarfes  
• 100% Erneuerbare Energien

**Stufe 1: Abwärme nutzen**

Abwärme aus den Kuhlaggeraten der Küche  
Abwärme aus dem Antrieb des Bahnbetriebs

**Stufe 2: Flache Sonnenkollektoren**

84 m<sup>2</sup> Sonnenkollektoren auf dem Dach der Bahnbergstation

**Stufe 3: Röhren-Sonnenkollektoren**

56 m<sup>2</sup> Röhren-Sonnenkollektoren an den Fenstern des Erdgeschosses

**Stufe 4: Erdwärme dank Erdsonden**

- 16 Erdsonden
- in 200m Tiefe
- total 3'210m Erdsonden
- In einem Feld von 20m x 50m angelegt

**Stufe 5: Photovoltaische Stromerzeugung**

- 228 m Solarzellen, 455 m<sup>2</sup>
- Strom 94'600 kWh/Jahr

J.C. Keller

[http://ftp.estm.xiag.ch/solar/infoscreen\\_muottas.php](http://ftp.estm.xiag.ch/solar/infoscreen_muottas.php)



Pour en savoir plus, vous pouvez visiter mon site:  
[www.conferences-climat-energie.ch](http://www.conferences-climat-energie.ch)

Accueil Conférences Climat Energie Contact & CV

### Conférences Climat & Energie

un produit proposé par Jean-Claude Keller  
Ingénieur EPF et physicien, maître de physique au gymnase de Morges (Vaud, Suisse)



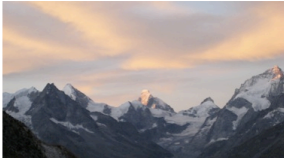
Vous voulez organiser une conférence ou un débat sur les questions qui touchent au réchauffement climatique et à la consommation d'énergie, alors prenez contact !



Vevy, le 29 octobre 2009



Cointin, le 12 mars 2009



Lever de soleil sur le Cervin (photo prise par J.C. Keller).  
Prise de vue depuis la région de l'hôtel Walshom dans le Val d'Anniviers (Valais, Suisse).



Gymnase Auguste Piccard, le 20 janvier 2010



Berlingen, le 18 juin 2009



Salina, le 29 mai 2009

Conférences Climat & Energie, site créé par Jean-Claude Keller

Dernière mise à jour du site : 16/3/2010

Mises à jour du dernier mois :

- Conférences
- Equilibre thermique de la Terre
- Bilan radiatif
- Les cellules de Hadley
- Mesures du rayonnement par satellite
- Cycles solaires
- Montée des eaux
- Arctique
- Evolution récente des températures
- Satellites
- IBUKI
- SMOS
- Cryosat-2

Mises à jour de l'avant-dernier mois :

J.C. Keller