

Un mondo in crisi d'entropia

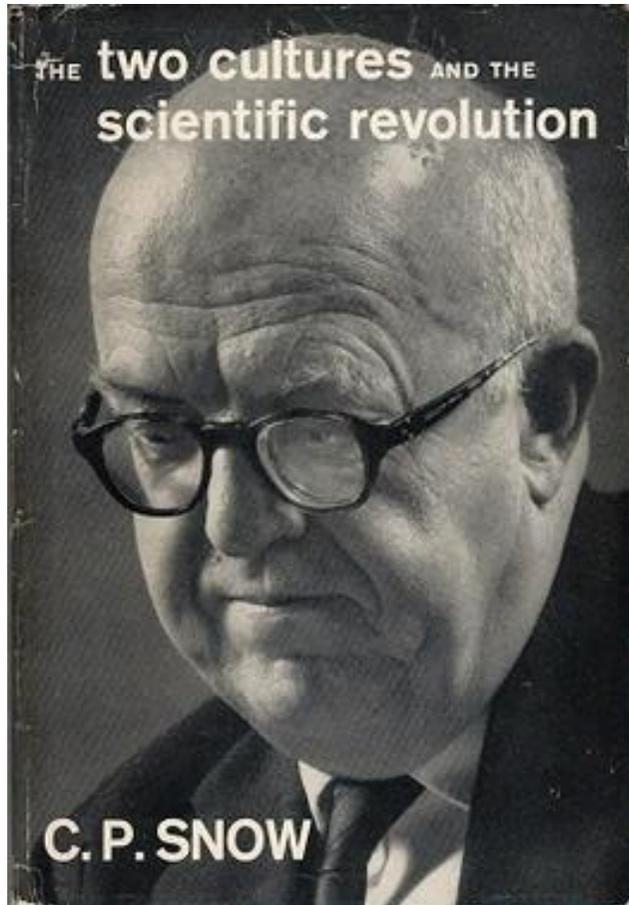


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TORINO

Marco Monteno
19 marzo 2019



Chi conosce il 2° principio della termodinamica?

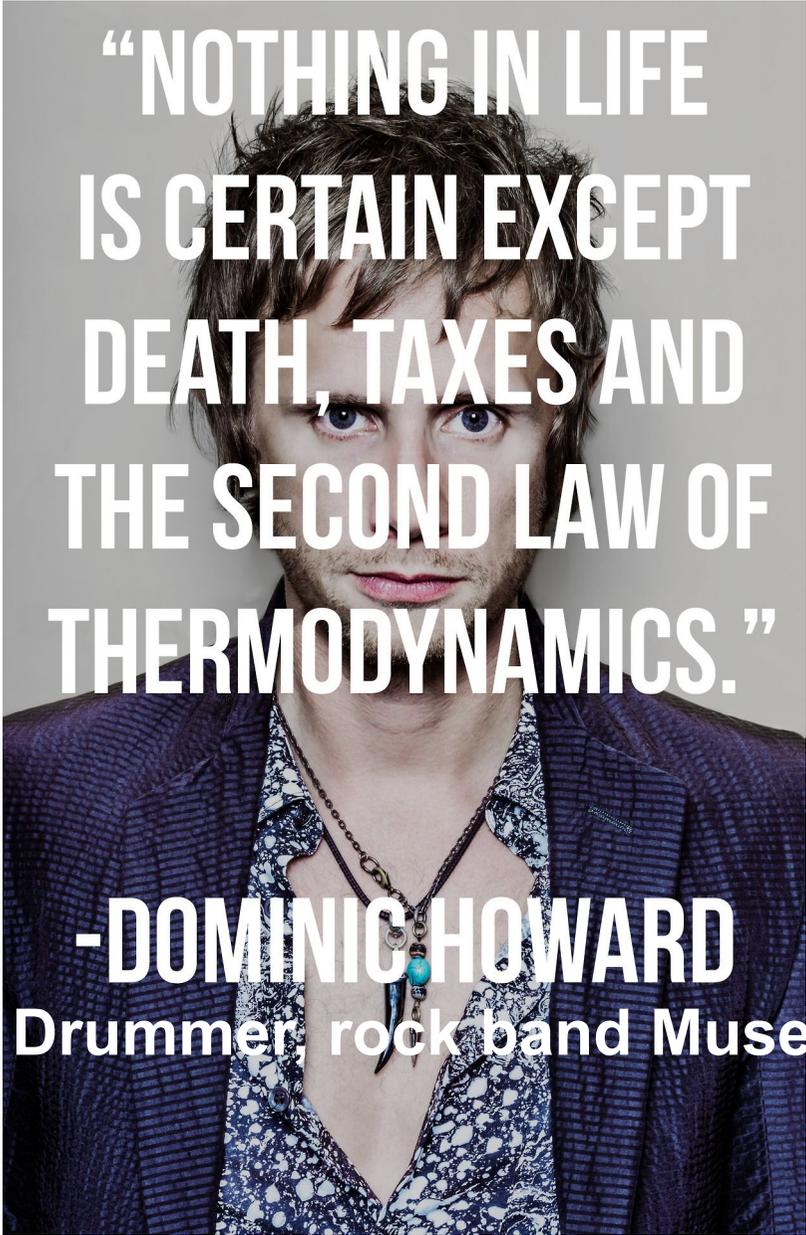


A good many times I have been present at gatherings of people who, by the standards of the traditional culture, are thought highly educated and who have with considerable gusto been expressing their incredulity at the illiteracy of scientists. **Once or twice I have been provoked and have asked the company how many of them could describe the Second Law of Thermodynamics.**

The response was cold: it was also negative. Yet I was asking something which is the scientific equivalent of: **“Have you read a work of Shakespeare’s?”**.

C. P. Snow, Rede Lecture, 1959

Convivere (con saggezza) con il 2° principio



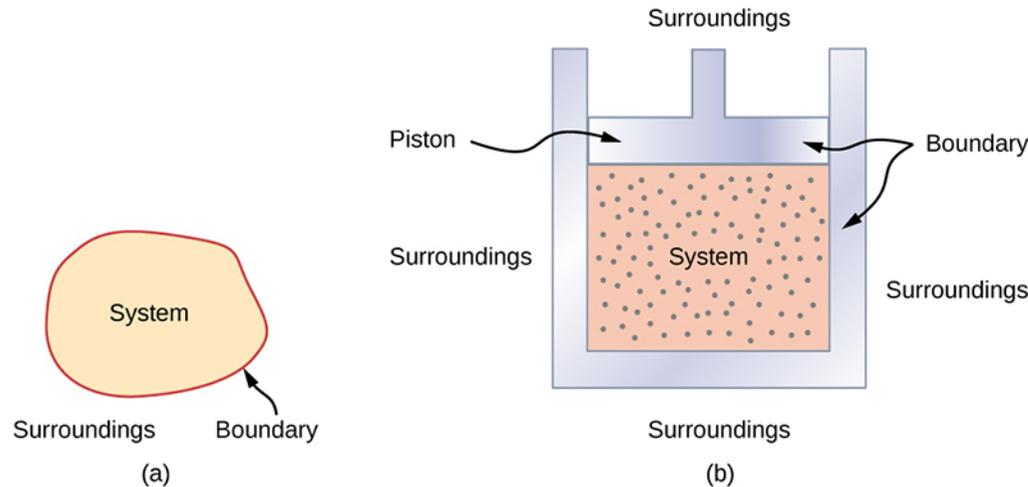
“NOTHING IN LIFE IS CERTAIN EXCEPT DEATH, TAXES AND THE SECOND LAW OF THERMODYNAMICS.”

-DOMINIC HOWARD
Drummer, rock band Muse



Sistemi termodinamici. Calore e temperatura

I **principi della termodinamica** descrivono le modalità di trasformazione dell'energia dentro un sistema, e degli scambi d'energia tra un sistema e l'ambiente esterno.



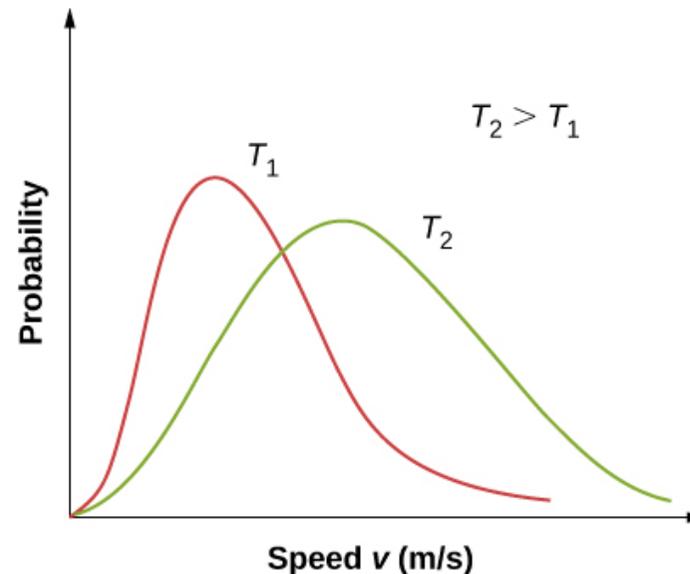
Come in meccanica, un sistema può scambiare energia compiendo **lavoro**, cioè tramite forze che producono un movimento delle pareti del sistema.

Il **calore** è un altro modo in cui un sistema può scambiare energia con un altro sistema, se la loro **temperatura** è differente (altrimenti essi sono in equilibrio termico).

Significato microscopico della temperatura

La **termodinamica statistica** si propone di spiegare le proprietà macroscopiche della materia in termini dei suoi atomi costituenti. Venne introdotta da **Ludwig Boltzmann** verso la metà dell'Ottocento, prima che l'idea di atomo di fosse affermata.

Distribuzione di Maxwell-Boltzmann



$$\langle v \rangle \propto \sqrt{T}$$

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

In un gas perfetto, calcolando il comportamento medio di un gran numero di atomi (o molecole) si è ricavata la **distribuzione delle velocità**, che dipende dalla **temperatura**.

A temperature più alte, cresce il moto di agitazione termica.

Il primo principio della termodinamica

Il **primo principio della termodinamica** è una formulazione del **principio di conservazione dell'energia** che include gli scambi di calore. L'esperimento di Joule ha consentito di stabilire che **lavoro e calore sono metodi equivalenti** per aumentare/diminuire l'energia di un sistema.

Si definisce allora una **funzione di stato energia interna U**, la cui variazione è:

$$\Delta U = Q - L$$

I principio

Sistema isolato ($Q=0;L=0$) $\Delta U=0$ cioè $U=\text{cost}$

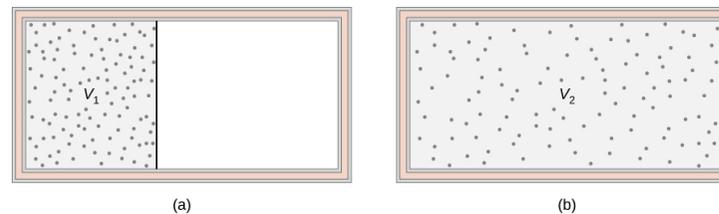
U è una funzione di stato, perché la sua variazione dipende solo dallo stato iniziale e da quello finale, indipendentemente dalla trasformazione eseguita. Invece Q e L dipendono dalla trasformazione.

I processi irreversibili

Sono **possibili in base al primo principio** solo i processi per i quali l'energia totale (sistema+ambiente esterno) è conservata.

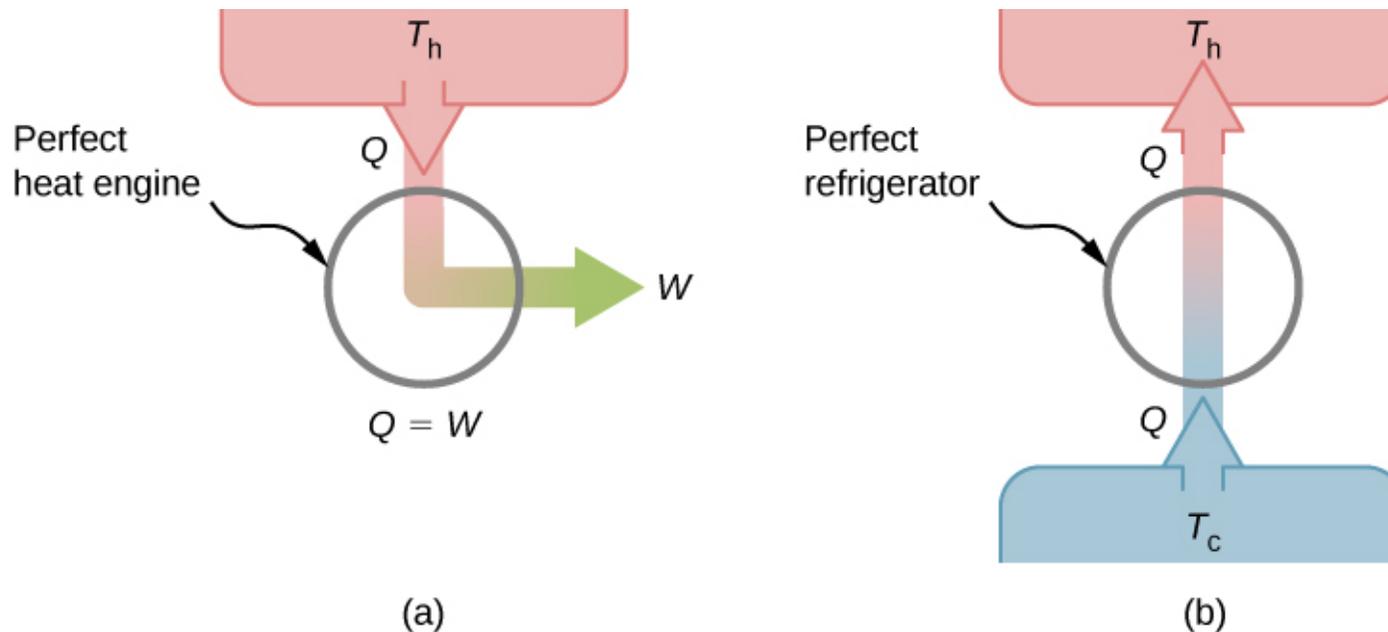
La Natura però manifesta delle **asimmetrie**: alcuni processi si svolgono spontaneamente solo in una direzione. I processi inversi, che sarebbero ammissibili in base al primo principio, non sono mai osservati, a meno di non intervenire con un'azione dall'esterno (tuttavia non si riuscirà mai a riportare nelle stesse condizioni sia il sistema sia l'ambiente).

Si parla allora di **processi irreversibili**.



Quali processi possono avvenire spontaneamente in un verso, e quali no? **La risposta viene dal Secondo Principio della Termodinamica.**

2° principio: i postulati di Kelvin e Clausius

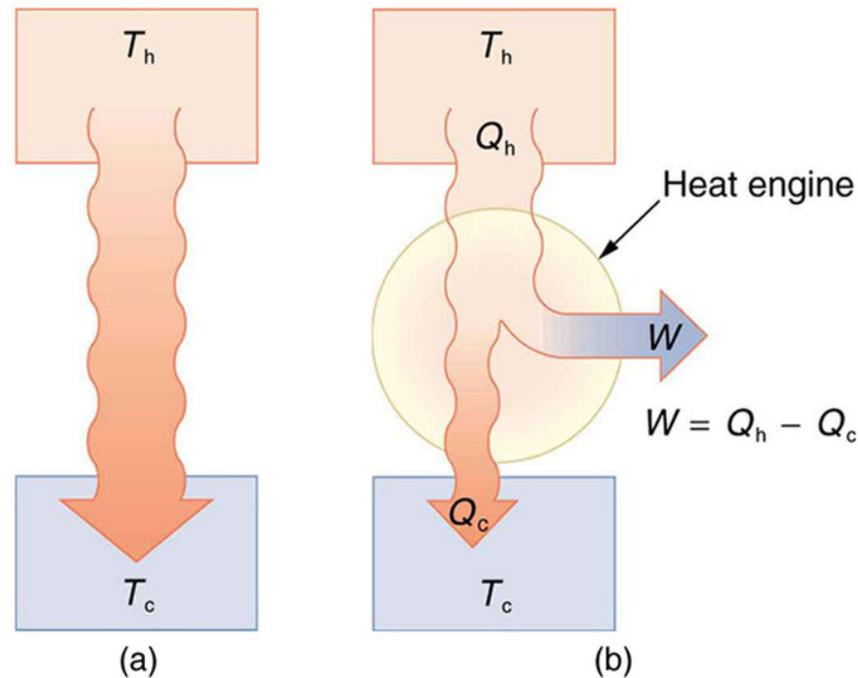


(a) **Postulato di Kelvin** Non esiste un motore ciclico perfetto (con efficienza 100%), cioè in grado di convertire interamente in lavoro il calore assorbito da una sola sorgente.

(b) **Postulato di Clausius** Il calore non scorre mai spontaneamente da un oggetto freddo a uno caldo. Cioè non è possibile costruire un frigorifero perfetto, che funzioni senza un input di energia dall'esterno.

I due enunciati di Kelvin e di Clausius del Secondo Principio della Termodinamica sono **logicamente equivalenti** (la dimostrazione è reperibile su qualunque libro di testo).

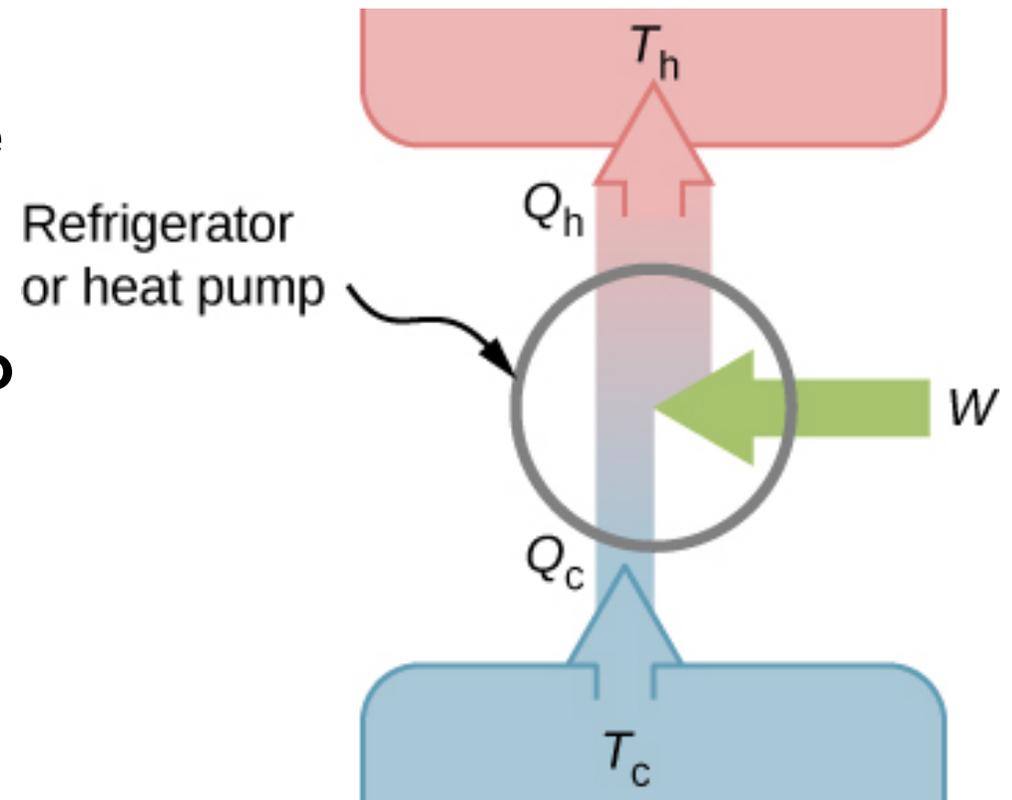
I processi spontanei ammessi dal 2° principio



- (a) Il **calore** passa **spontaneamente** da un oggetto caldo a uno più freddo
- (b) Un **motore termico** funziona solo grazie al trasferimento **spontaneo** di calore da una sorgente calda ad una fredda. Solo una parte del calore assorbito viene convertita in lavoro esterno. Il resto viene disperso come calore ceduto alla sorgente fredda.

Frigoriferi e pompe di calore

Quando un **ciclo motore** viene percorso in **ordine inverso**, **compiendo dall'esterno un lavoro**, si ottiene un **frigorifero** (o una **pompa di calore**, a seconda dello scopo).



- Nel **frigorifero** si vuole tenere freddo l'interno, rimuovendo e disperdendolo in un ambiente più caldo (la cucina).
- Nella **pompa di calore** si vuole riscaldare l'interno della casa prelevando calore dall'ambiente esterno, più freddo.

L'entropia

Clausius ha intuito che i due diversi enunciati del Secondo Principio sono conseguenza di un'unica legge generale, espressa in termini di una nuova funzione di stato, chiamata **entropia**.

Durante un qualunque processo in cui un sistema scambia calore Q con l'ambiente circostante ad una temperatura T , l'**entropia del sistema** subisce una **variazione ΔS** pari a:

$$\Delta S = \frac{Q_{rev}}{T}$$

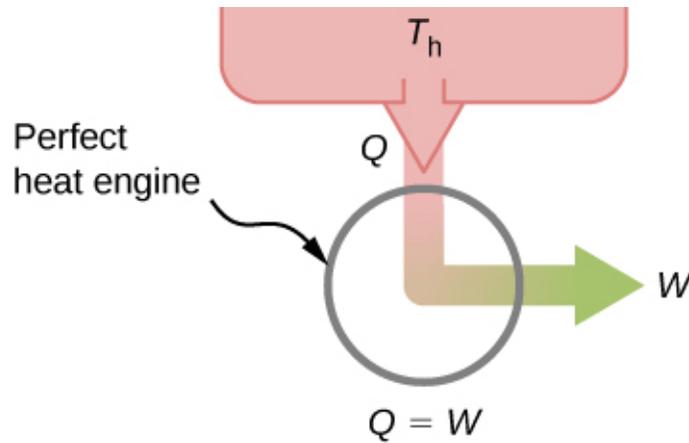
L'entropia e il Secondo Principio

Durante una trasformazione, la variazione dell'entropia di un sistema è ΔS ; contemporaneamente l'**entropia dell'ambiente esterno** subisce una variazione ΔS_{amb} . Pertanto l'entropia dell' **universo** (cioè l'insieme **sistema+ambiente**) subisce la variazione complessiva:

$$\Delta S_U = \Delta S + \Delta S_{\text{amb}}$$

Il **Secondo Principio della Termodinamica** viene espresso con la seguente legge: $\Delta S_U > 0$ ovvero: **Qualunque processo spontaneo (e irreversibile) è accompagnato da un aumento d'entropia dell'universo.**

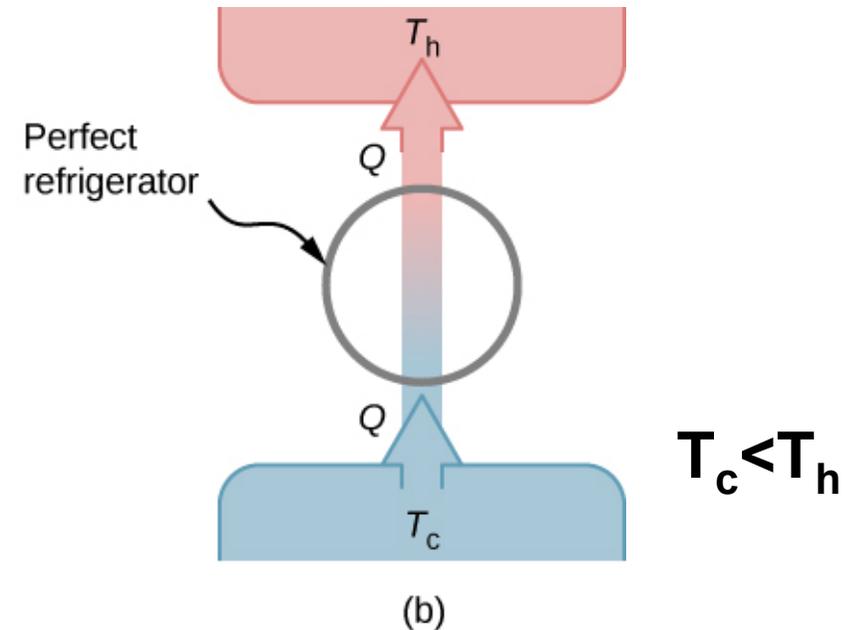
Verifica di consistenza con i due postulati



Se esistesse un motore perfetto, contraddicendo il postulato di Kelvin:

$$\Delta S = 0 \text{ (ciclo)} ; \Delta S_{\text{amb}} = -Q/T_h$$

$$\Delta S_U = \Delta S_{\text{amb}} = -Q/T_h < 0$$



Se esistesse un frigorifero perfetto, contraddicendo il postulato di Clausius:

$$\Delta S_U = \Delta S_{\text{amb}} = -Q/T_c + Q/T_h < 0$$

In entrambi i casi risulterebbe che $\Delta S_U < 0$, cioè verrebbe negato il principio dell'aumento dell'entropia.

Ambiente rumoroso, analogo a un sistema ad alta T.

Lo starnuto equivale a una cessione di calore Q.

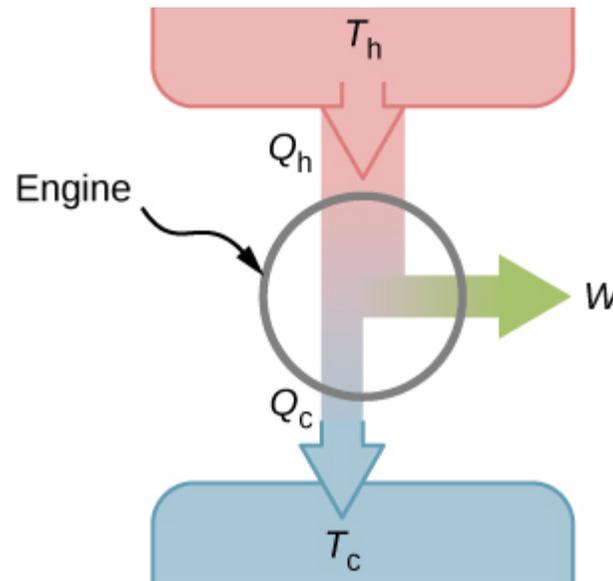


L'effetto, analogo alla variazione d'entropia $\Delta S=Q/T$ è maggiore nell'ambiente a bassa T



Ambiente silenzioso, analogo a un sistema a bassa T.

Il 2° principio e il rendimento di un motore reale



Un'altra conseguenza del secondo principio della termodinamica $\Delta S_U = 0$, riguarda il rendimento dei motori reali operanti tra due sorgenti di calore a temperature T_h (calda) e T_c (fredda):

$$\eta = \frac{W}{Q_h} \leq 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Tutte le macchine reali di questo tipo hanno **un rendimento inferiore a quello della macchina reversibile di Carnot** (a sua volta inferiore a 1).

Il 2° principio e il degrado dell'energia.

Riassumendo i vari aspetti del 2° principio:

$\Delta S_U > 0$ per tutti i processi spontanei (e irreversibili)

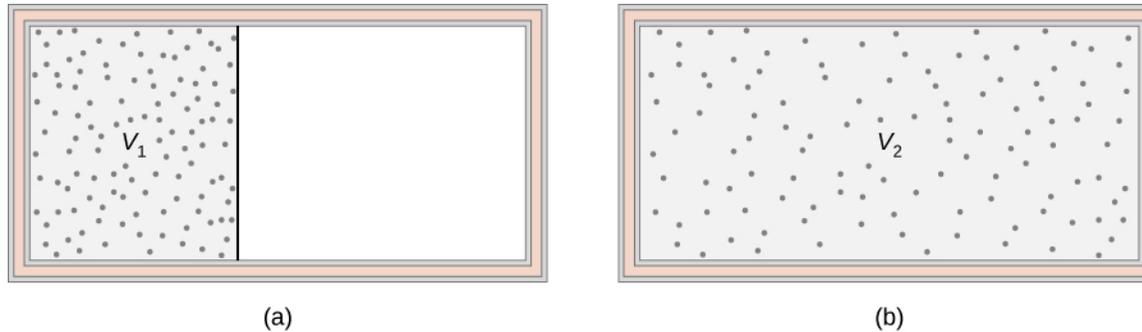
L' aumento d'entropia dell'Universo costituisce l'indicatore di una trasformazione spontanea (tra tutte quelle possibili, ovvero che conservano l'energia), e corrisponde al fatto che l'energia viene progressivamente immagazzinata a temperature sempre più basse.

Cioè **la direzione spontanea di una trasformazione è quella che produce una riduzione della qualità dell'energia**. La quantità di energia si conserva, ma globalmente essa diventa meno utilizzabile per fare lavoro.

QUESTA E' LA VISIONE "MACROSCOPICA" DELL'ENTROPIA. TUTTAVIA NON ABBIAMO ANCORA DEFINITO CHE COSA SIA, MA SOLO LA SUA VARIAZIONE !!

Il significato microscopico dell'entropia

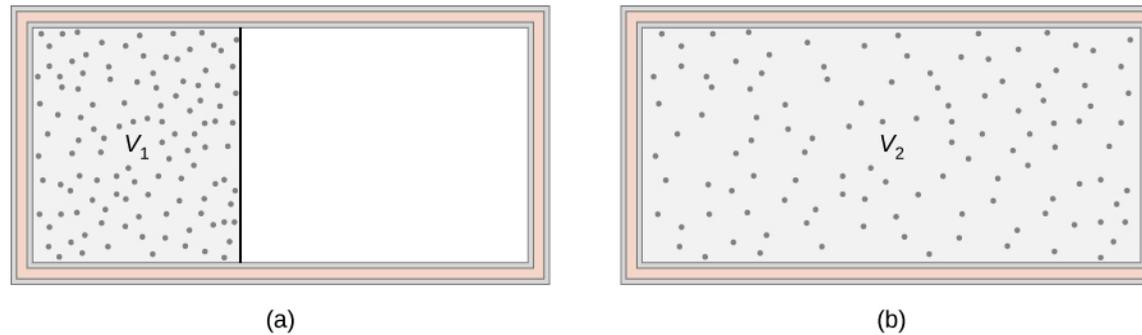
Consideriamo un recipiente a due scomparti, inizialmente riempito di un gas perfetto solo da una metà. Poi apriamo uno sportello di separazione, e lasciamo il gas libero di espandersi.



Il gas si espanderà fino ad occupare tutto lo spazio disponibile, venendosi così a trovare in uno stato finale **“più disordinato”**, o anche, in cui disponiamo di **“meno informazioni”** su dove si trova una singola molecola).

È un **processo irreversibile**, che avviene spontaneamente in una direzione, mentre **il processo opposto** (con le molecole che tornano tutte da una parte) **è praticamente impossibile**.

L'approccio probabilistico di Boltzmann



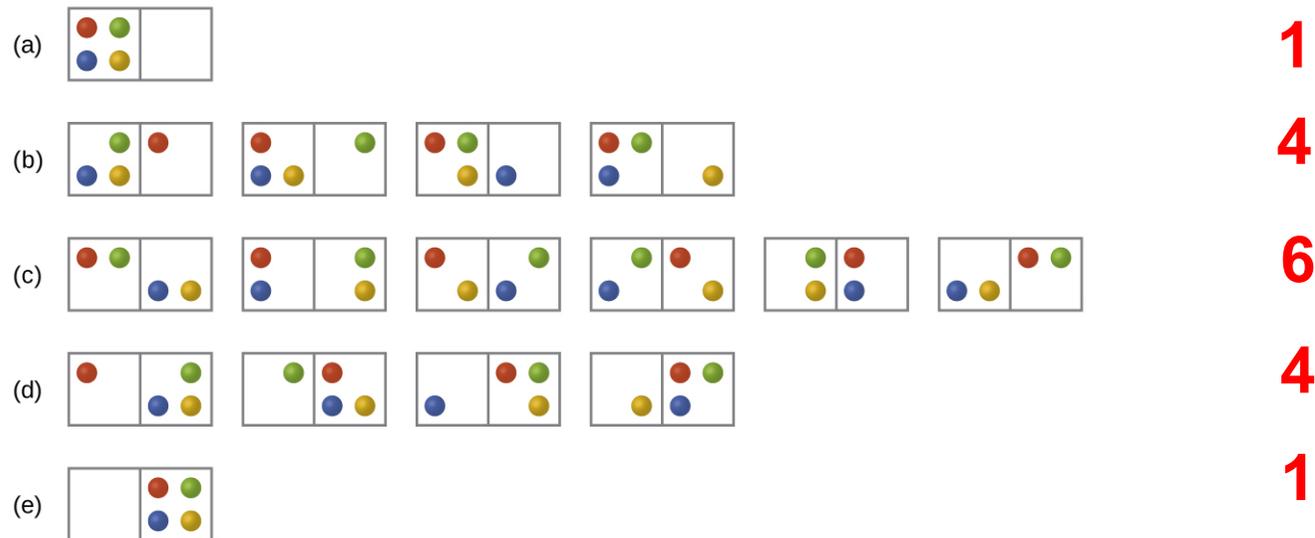
L'entropia dell'universo (che qui coincide con quella del sistema) è aumentata fino a un valore massimo, quando si stabilisce l'equilibrio: circa metà delle molecole sono a sinistra, metà a destra

Perché? Perché **è la configurazione più probabile** per il sistema di N molecole, con N enorme (dell'ordine del numero di Avogadro).

La **configurazione più probabile** è lo stato macroscopico con determinati p , V , T (**MACROSTATO**) corrispondente al maggior numero di configurazioni microscopiche tra loro equiprobabili di N molecole tra loro indistinguibili.

L'entropia e il disordine: la formula di Boltzmann

Consideriamo il caso di $N=4$ molecole, e contiamo il numero di microstati corrispondenti ai 5 macrostati possibili: $(4,0)$, $(3,1)$, $(2,2)$, $(1,3)$ e $(0,4)$, dove i due numeri si riferiscono alle molecole che si trovano nello scomparto di sinistra e di destra.



Il macrostato di equilibrio, cioè quello di massima entropia, è quello con il maggior numero di microstati.

Perciò **Boltzmann** ha così definito l'**entropia S** di un macrostato in termini del numero Ω dei suoi microstati: $S = k_B \log \Omega$

Organismi viventi e società

Vi sono delle analogie tra:

- **organismi viventi** (cellule, animali, piante)
- **ecosistemi naturali** (biosfera)
- **organismi sociali** (casa, città, società)

In tutti i casi, al sistema **per vivere e crescere** servono risorse di **cibo/energia** immesse dall'esterno per contrastare il degrado naturale che porterebbe alla “morte” del sistema.

Inoltre il “**metabolismo**” di ogni sistema crea **scorie/rifiuti che inquinano**, e vanno rimosse.

Crisi energetiche e crisi d'entropia

- Se in un sistema non si immette cibo/energia: “collasso” del sistema per **crisi energetica**
- Se scorie/rifiuti non vengono smaltiti: il sistema va in **crisi d'entropia**



Il degrado progressivo di ogni sistema richiede manutenzione, altrimenti...



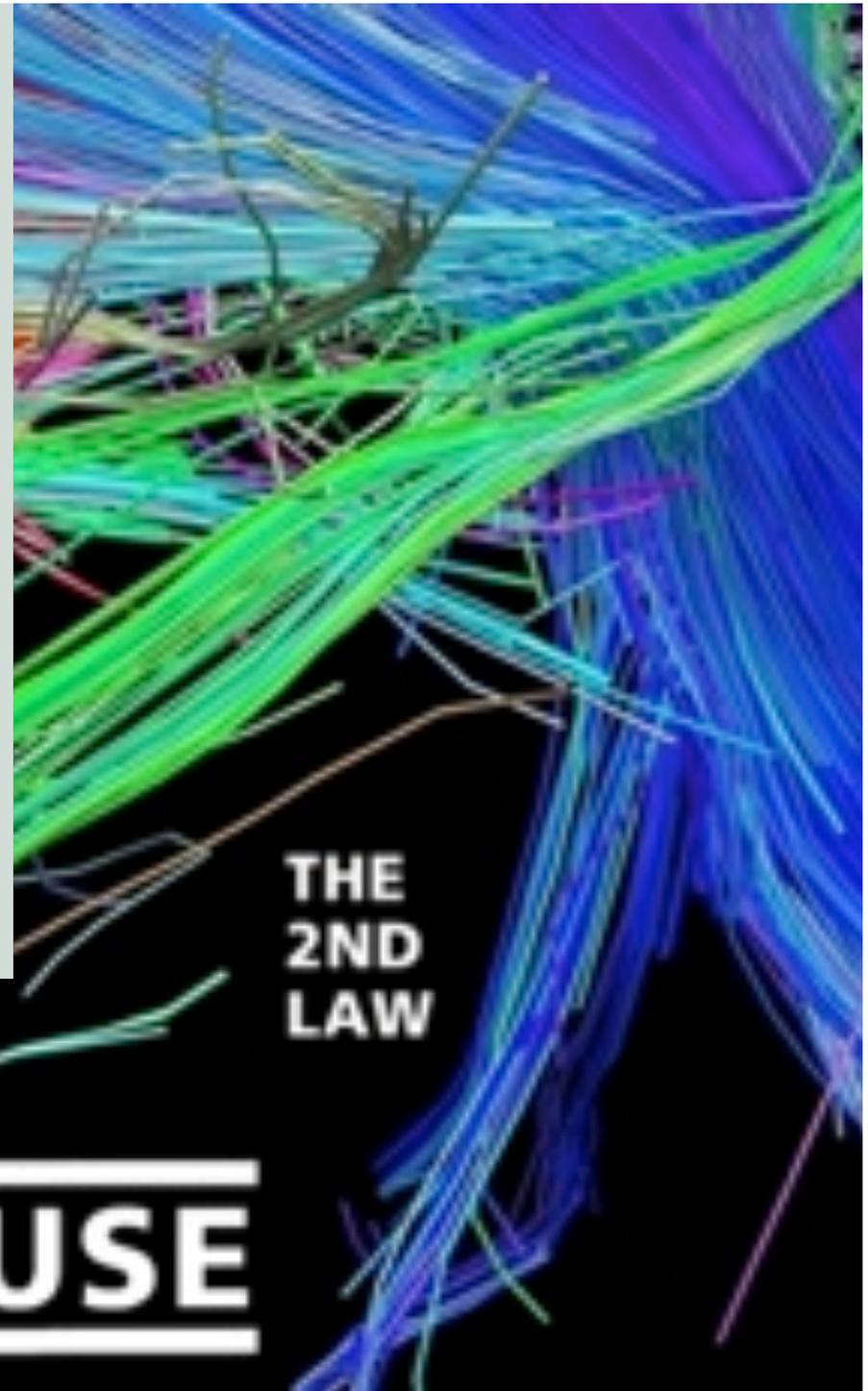
Anche il nostro pianeta/biosfera corre seri rischi per la sua crescita e sopravvivenza, derivanti dall'esaurirsi delle risorse energetiche o dalla troppa entropia.

La pretesa di un modello di crescita illimitata in un pianeta con risorse finite determina una situazione....

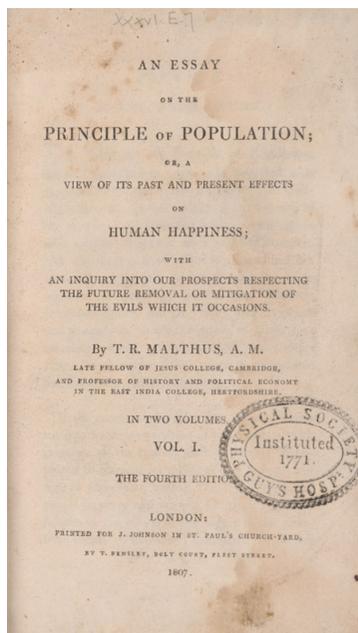
INSOSTENIBILE!!!!

The 2nd Law: Unsustainable Muse

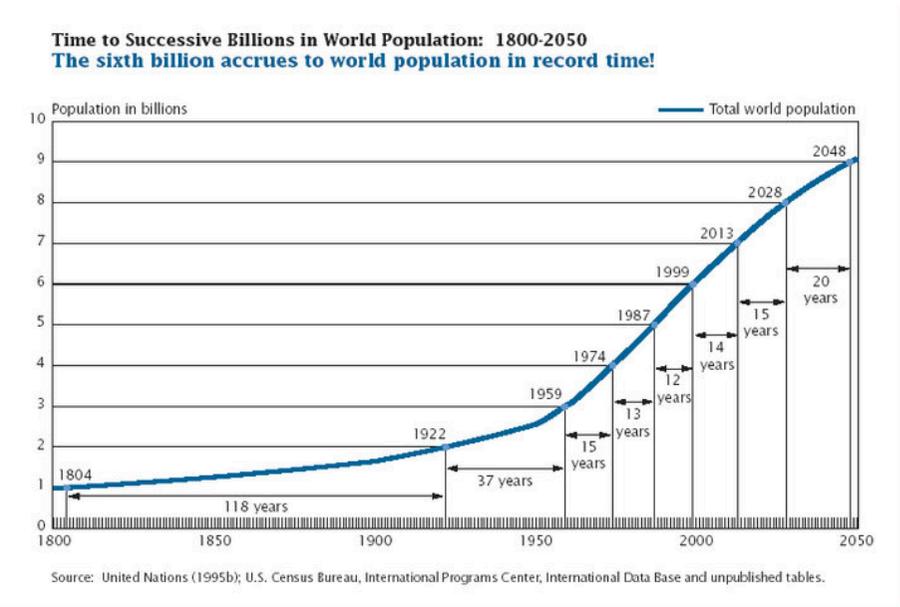
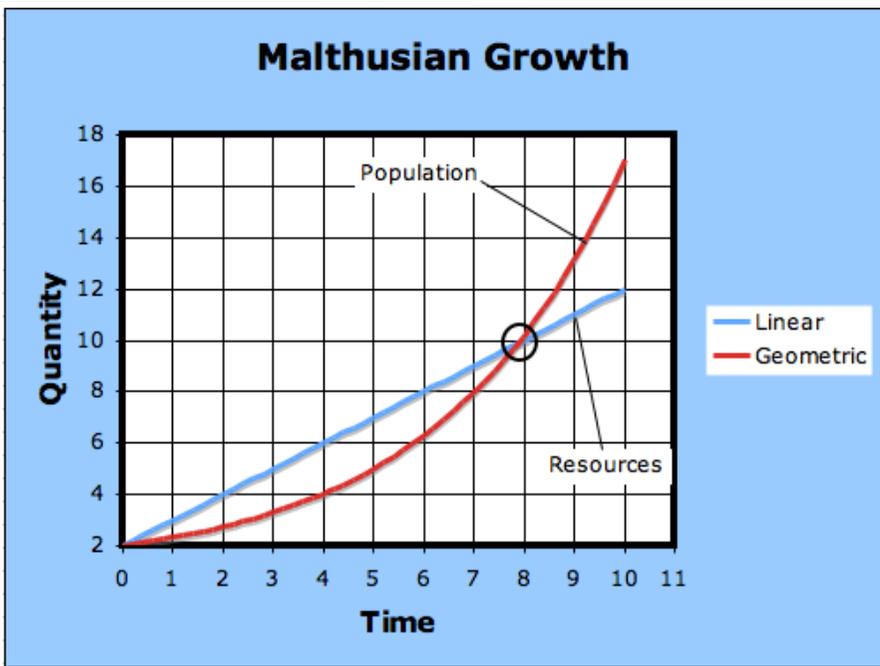
**All natural and technological processes
Proceed in such a way that the availability
Of the remaining energy decreases
In all energy exchanges, if no energy
Enters or leaves an isolated system
The entropy of that system increases
Energy continuously flows from being
Concentrated to becoming dispersed
Spread out, wasted and useless
New energy cannot be created and high
grade
Energy is being destroyed
An economy based on endless growth is
Unsustainable....**



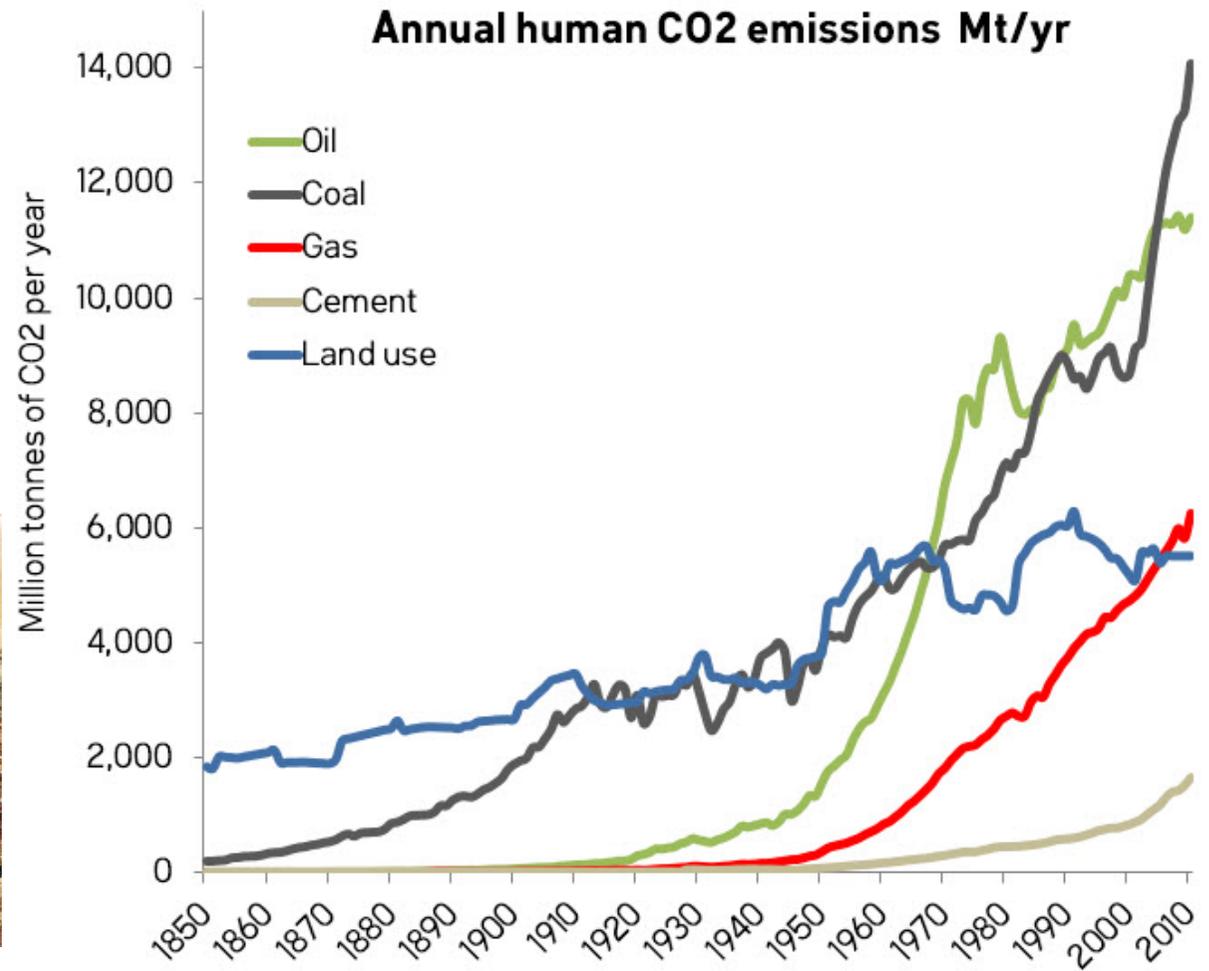
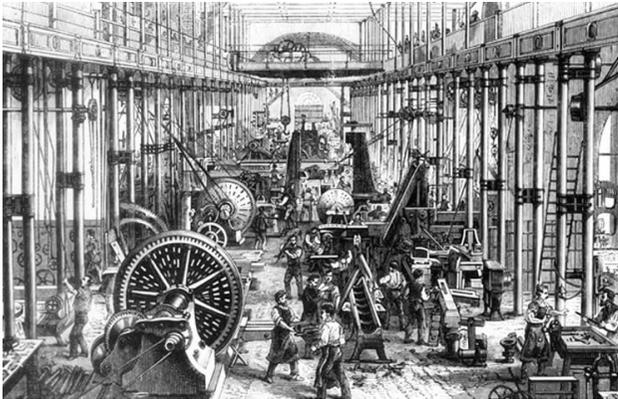
Il saggio sui principi della popolazione (1796)



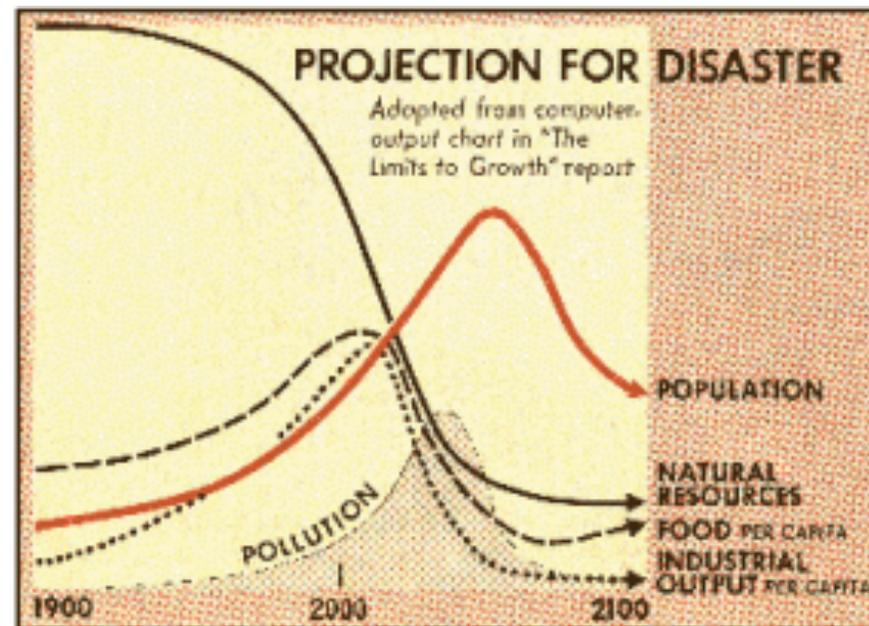
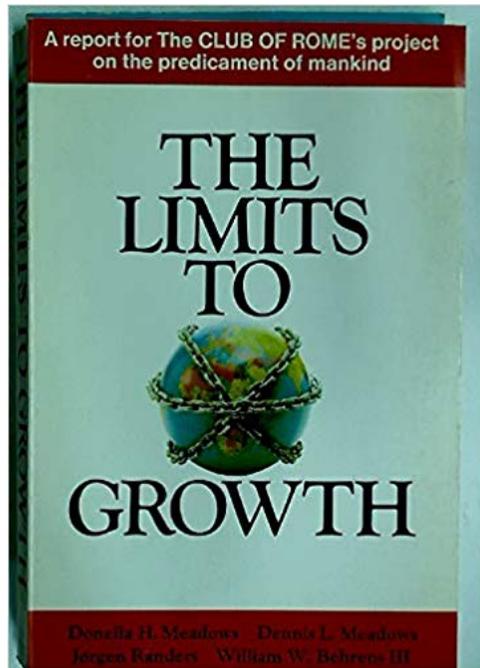
Dati i diversi tassi di crescita delle risorse (agricole) e della popolazione, prima o poi avverrà un collasso del sistema economico (dopo circa 200 anni, cioè intorno al 2000!).



Rivoluzione industriale e emissioni di carbonio

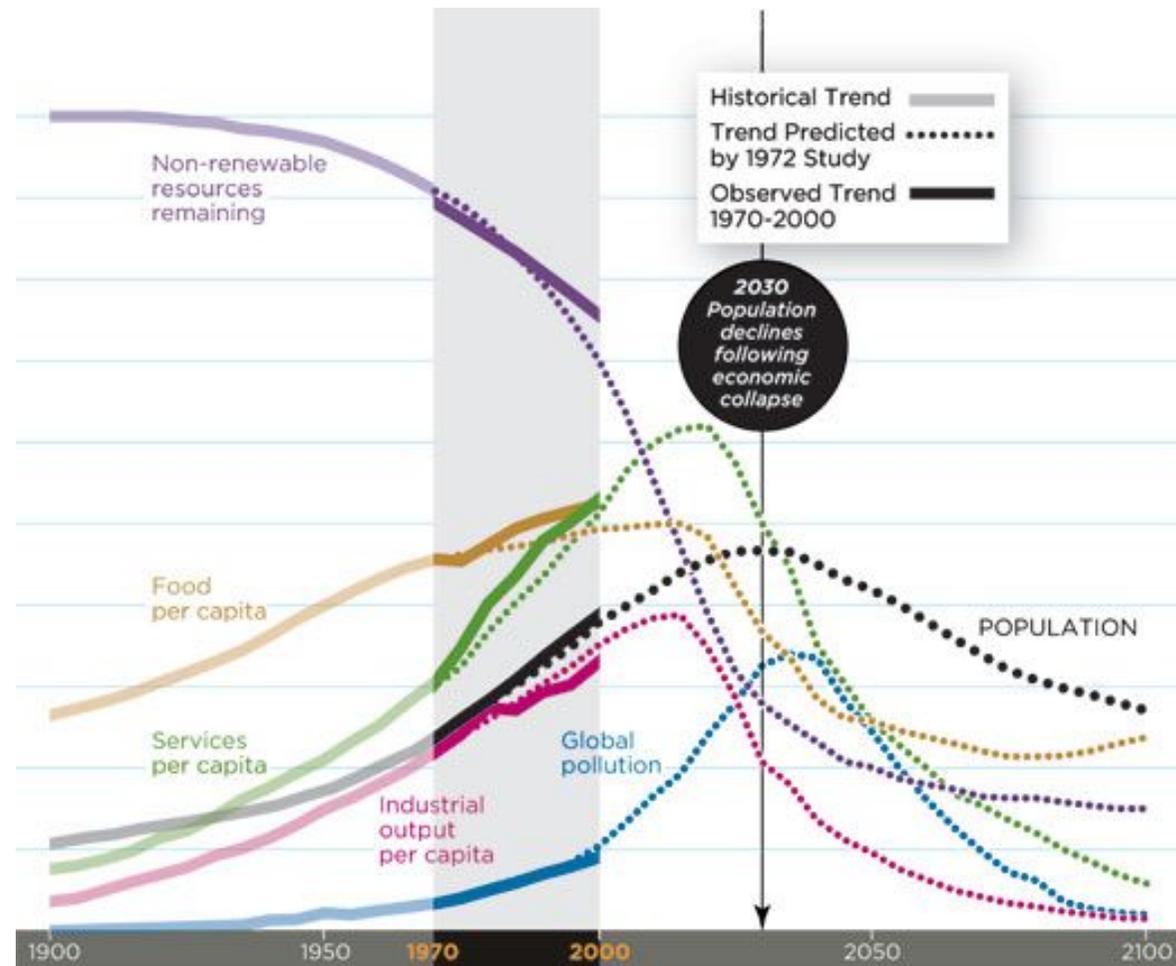
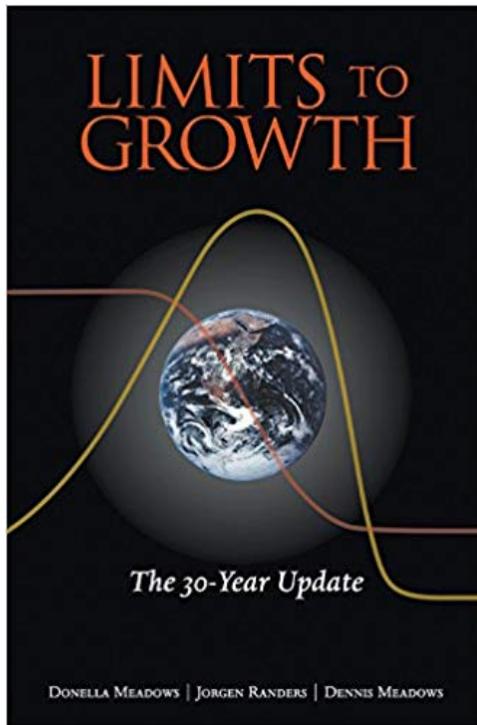


Limits to Growth (MIT e Club di Roma) - 1972

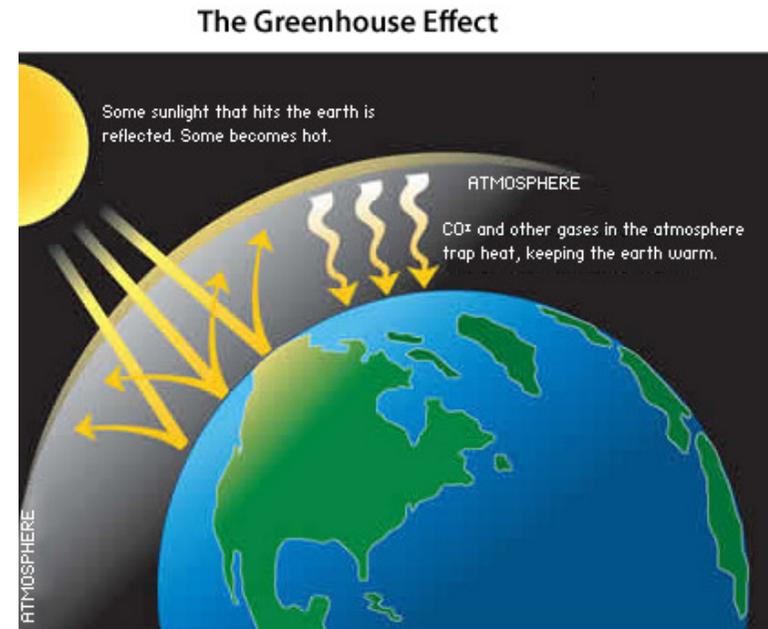
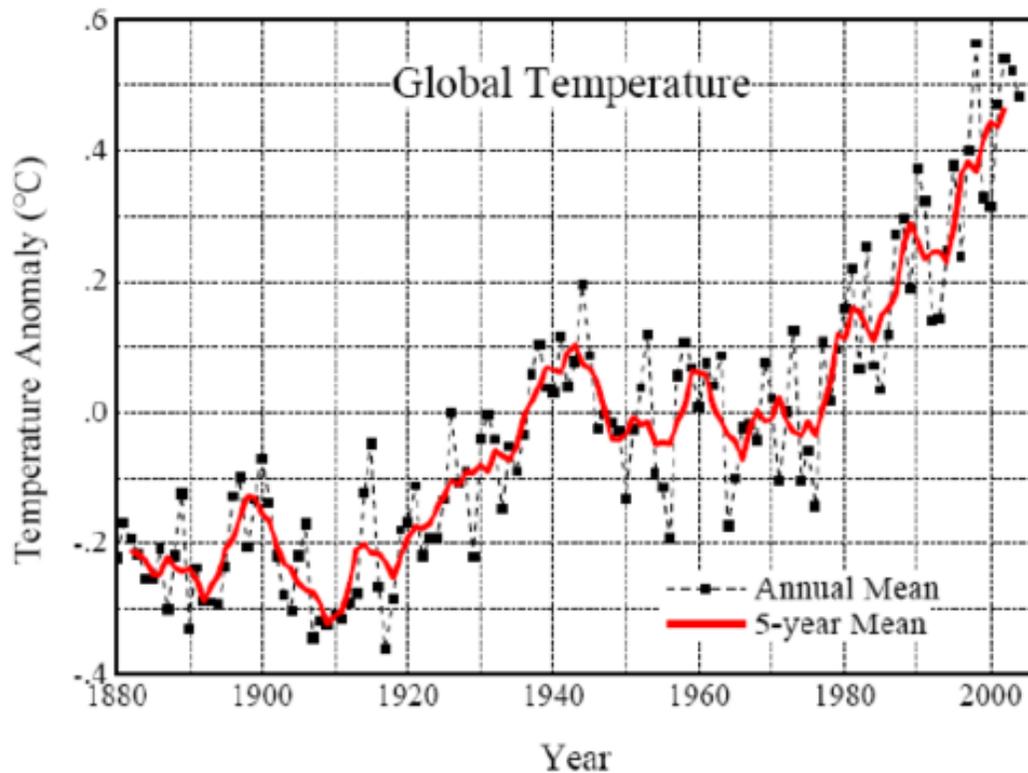


Limits to Growth, 30 anni dopo

Collasso previsto per esaurimento risorse come in Malthus (combustibili fossili anziché terra)



Riscaldamento globale e effetto serra

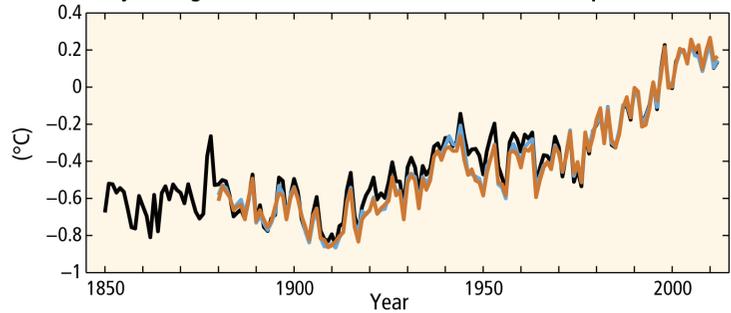


La temperatura globale è aumentata di circa 1 grado rispetto all'era pre-industriale (e molto velocemente negli ultimi 30 anni)

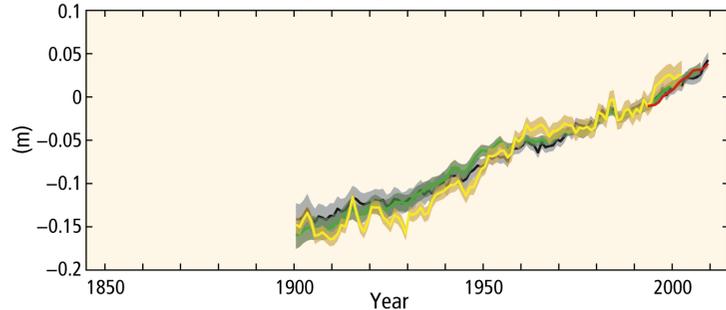
L'aumento è spiegato con l' "effetto serra" causato dall'aumento di concentrazione in atmosfera dei gas-serra (principalmente CO₂, ma anche CH₄ e N₂O)

Evidenza di correlazione

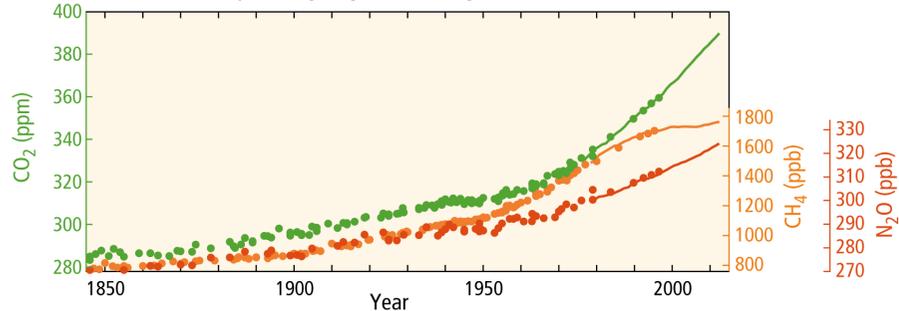
(a) Globally averaged combined land and ocean surface temperature anomaly



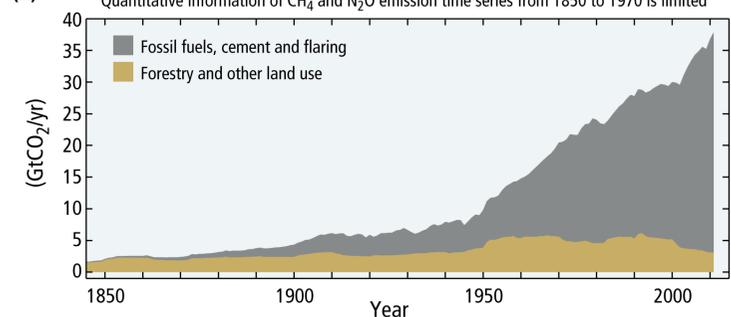
(b) Globally averaged sea level change



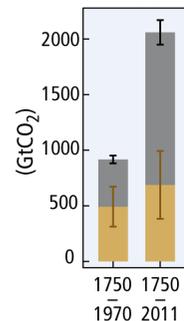
(c) Globally averaged greenhouse gas concentrations



(d) Global anthropogenic CO₂ emissions



Cumulative CO₂ emissions



Il brusco aumento di T si manifesta qualche anno dopo l'impennata della concentrazione di CO₂ in atmosfera e delle emissioni di C.

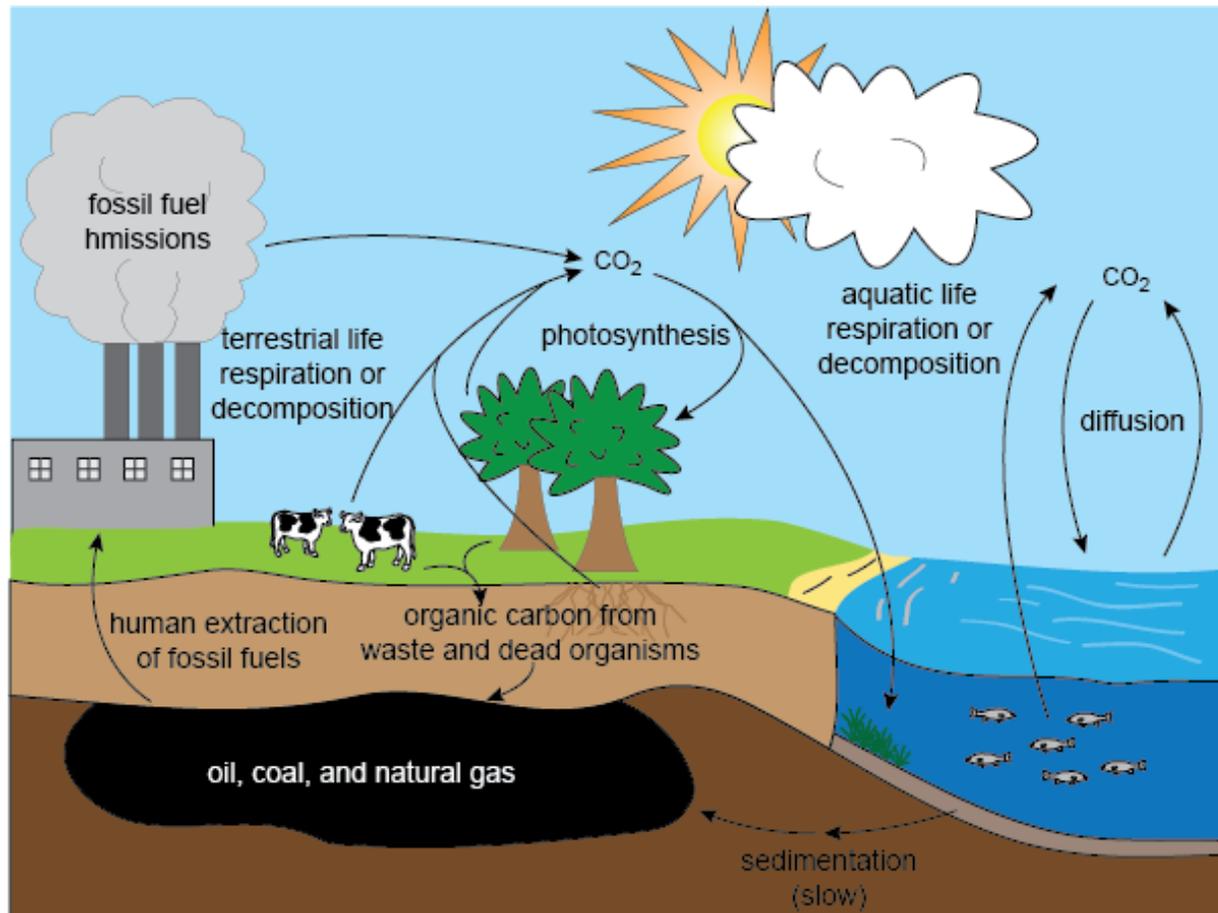
Ciclo del carbonio nella biosfera

La reazione di fotosintesi



catturando CO_2 abbassa l'entropia della biosfera grazie all'input dell'energia solare.

Ma l'equilibrio è saltato: la biosfera è destabilizzata.



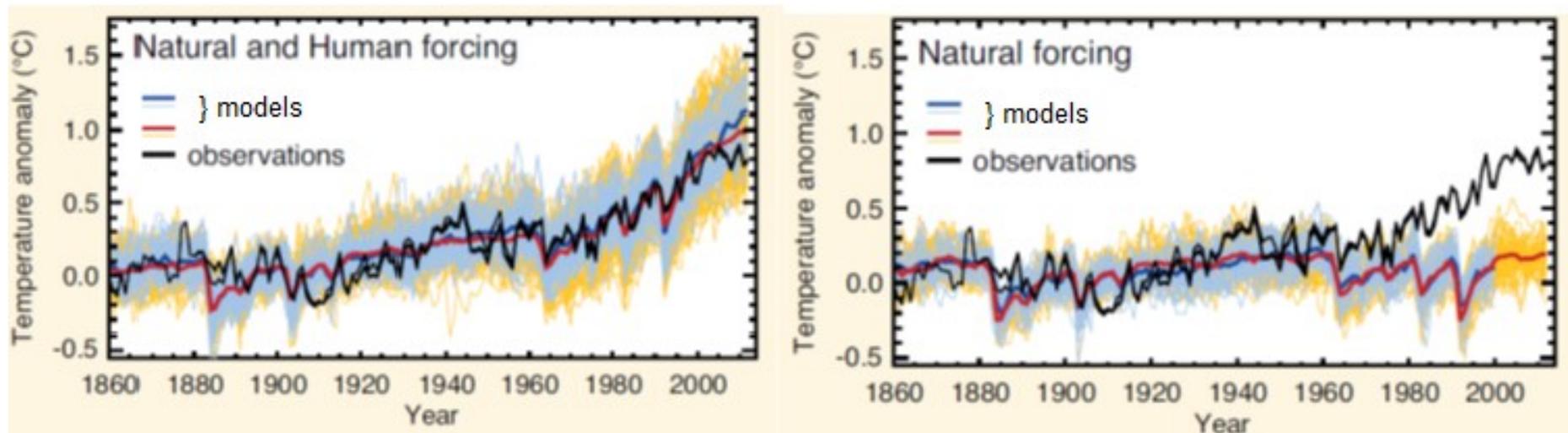
Riscaldamento globale e cambiamento climatico



Riscaldamento globale e cambiamento climatico



Modelli climatici e influenza dell'Uomo

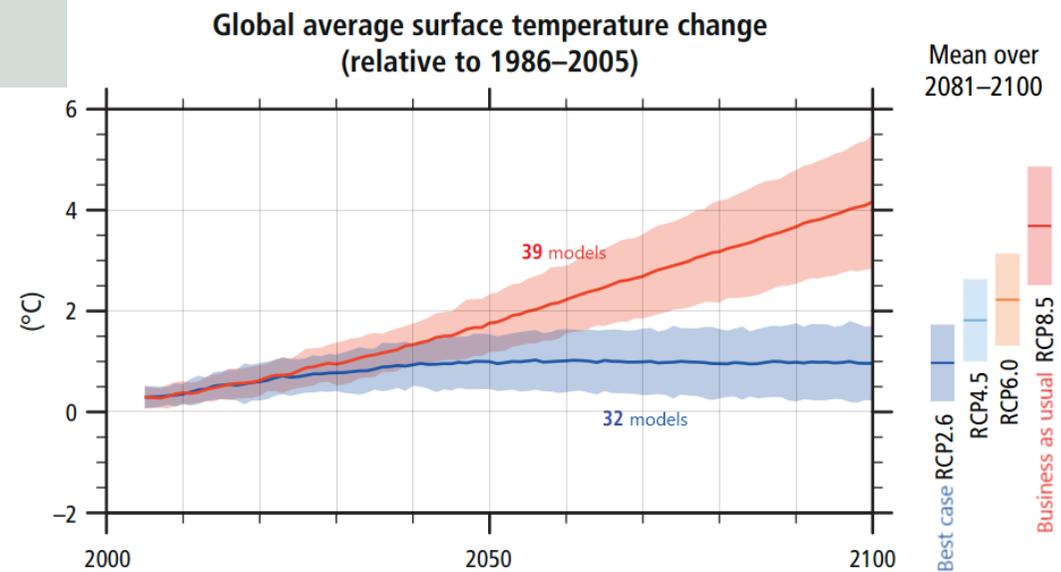
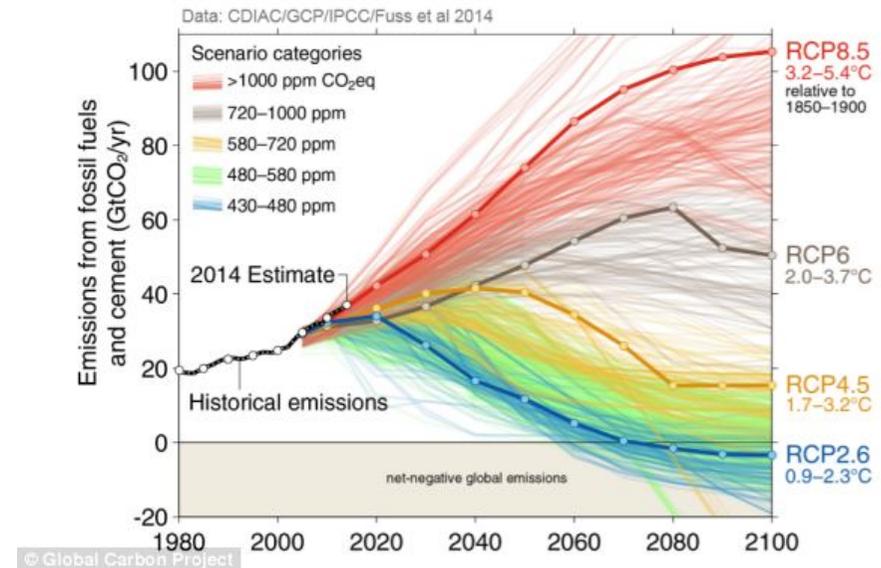


L'effetto delle emissioni dovute alle attività umane inizia a vedersi a partire dagli anni '80

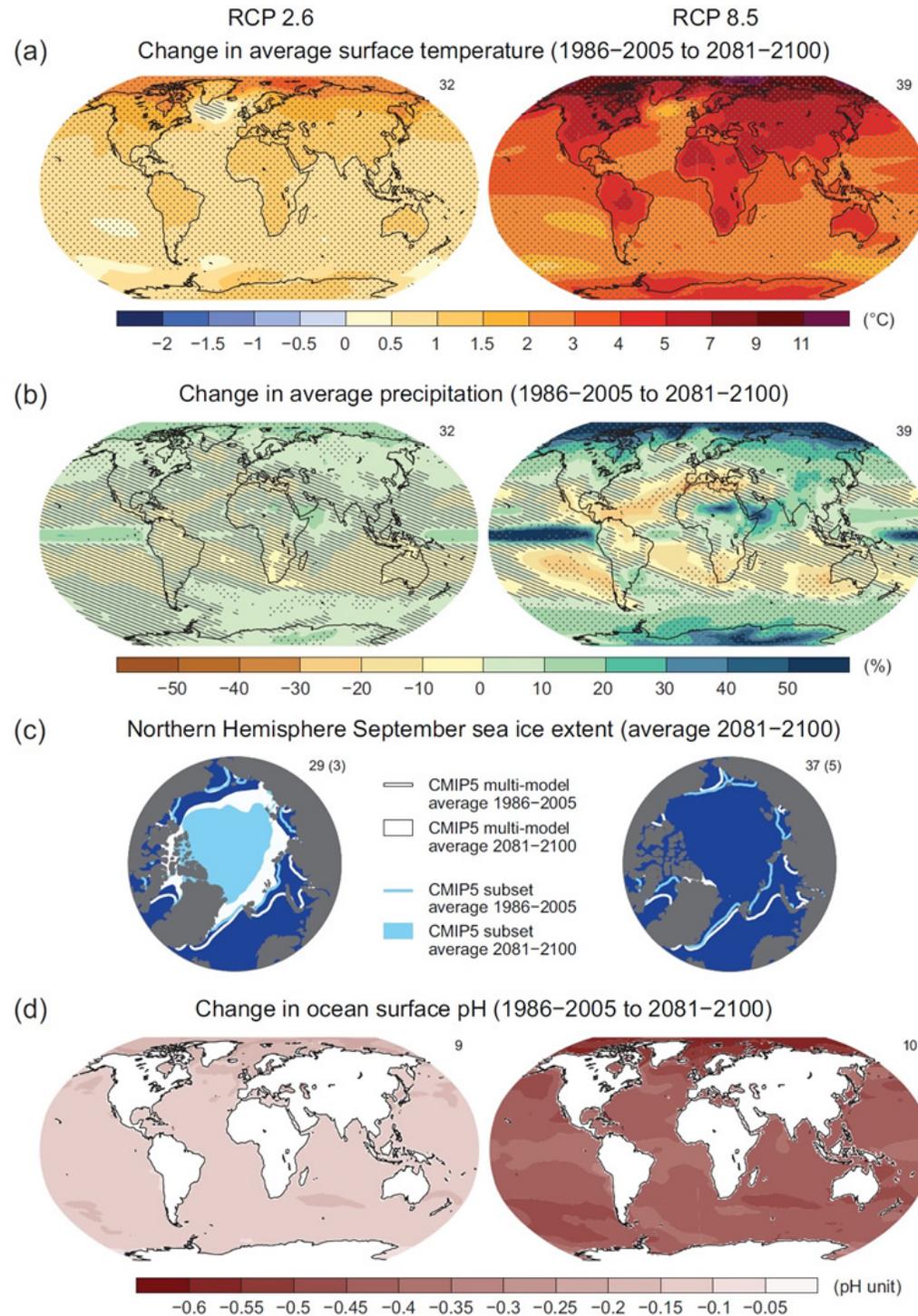
Previsioni climatiche per il XXI secolo

Previsioni per il XXI sec in 4 scenari di riduzione delle emissioni di C:

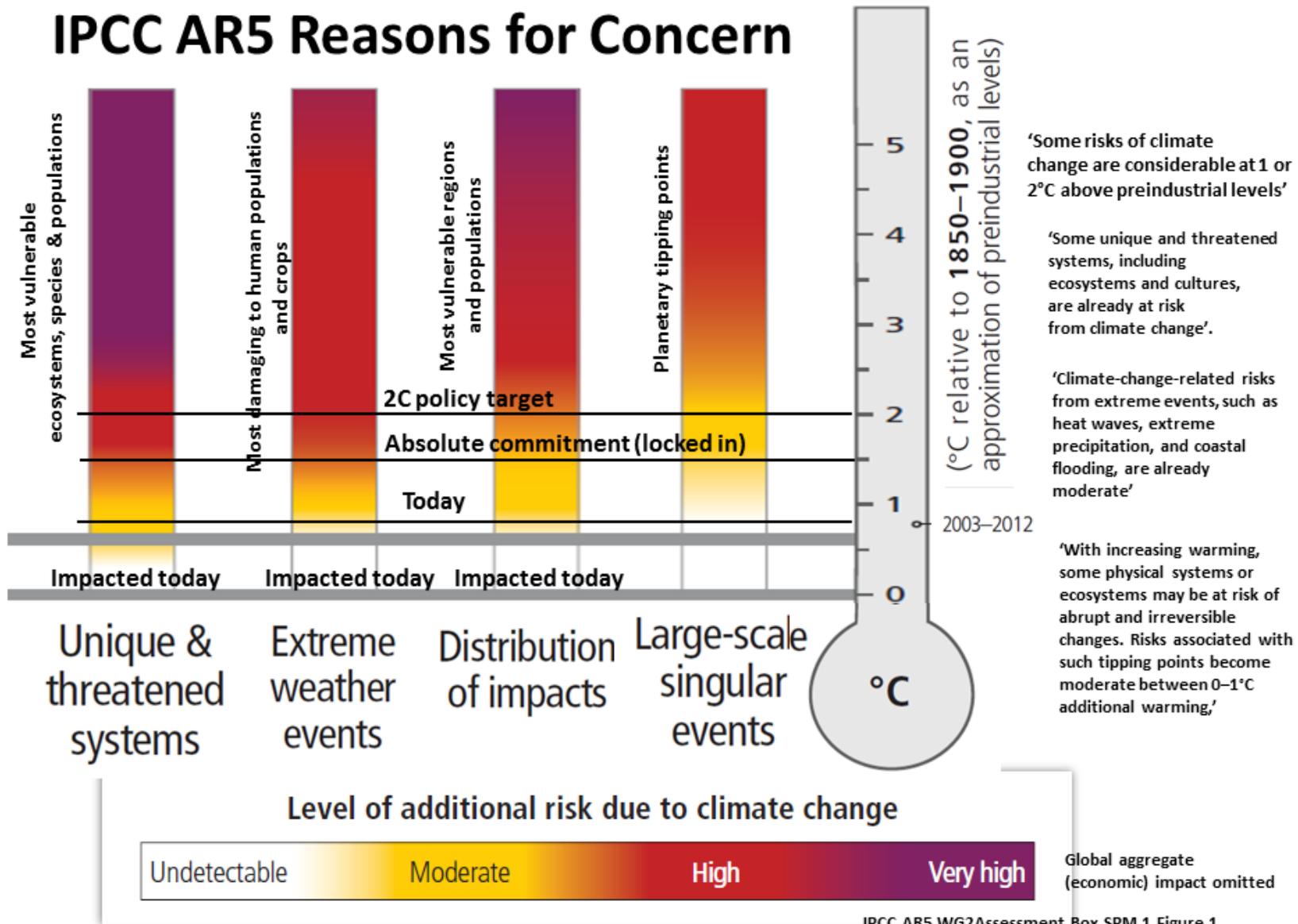
- 1 RCP 2.6 picco emissioni 2020
- 2 RCP 4.5 picco emissioni 2040
- 3 RCP 6 picco emissioni 2080
- 4 RCP 8.5 Business as usual



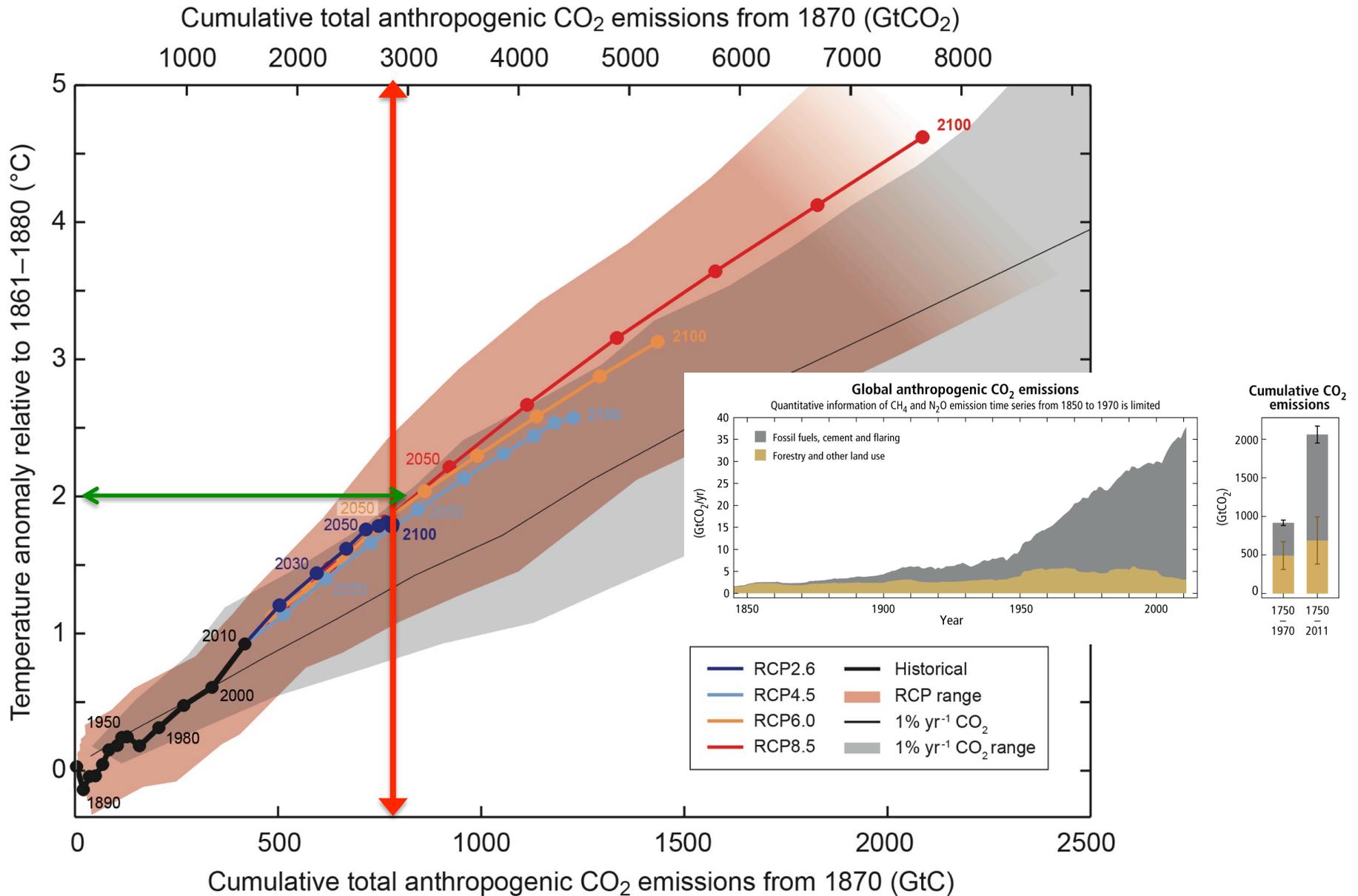
Impatto del riscaldamento sul pianeta nei due scenari estremi



Il limite massimo dei 2 gradi (entro il 2100)



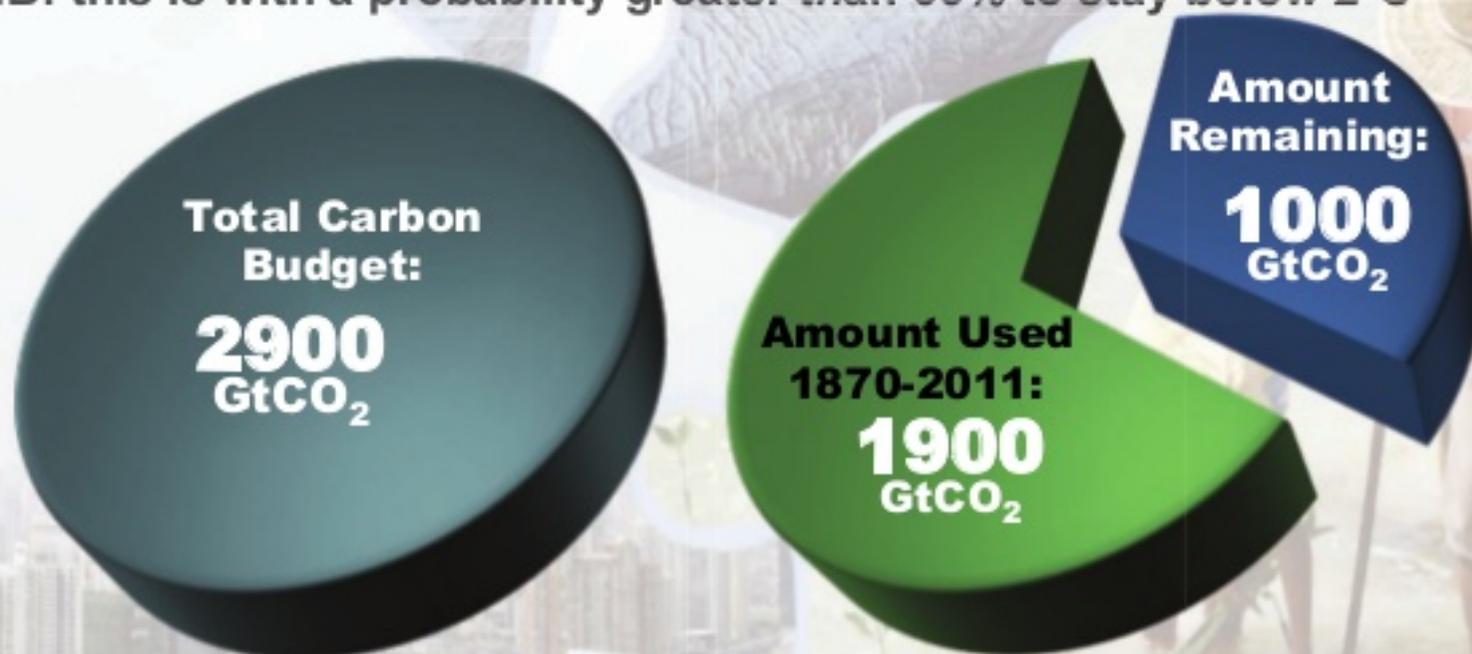
Il limite massimo alle emissioni



Budget restante di carbonio?

The window for action is rapidly closing

65% of the carbon budget compatible with a 2°C goal is already used
NB: this is with a probability greater than 66% to stay below 2°C



NB: Emissions in 2011: 38 GtCO₂/yr

AR5 WGI SPM

IPCC AR5 2013-2014



- ❑ L'influenza umana sul clima è evidente
- ❑ Più destabilizziamo il clima, maggiori saranno i rischi di impatti gravi e irreversibili
- ❑ Abbiamo i mezzi per limitare il cambiamento climatico e per costruire un futuro in modo sostenibile

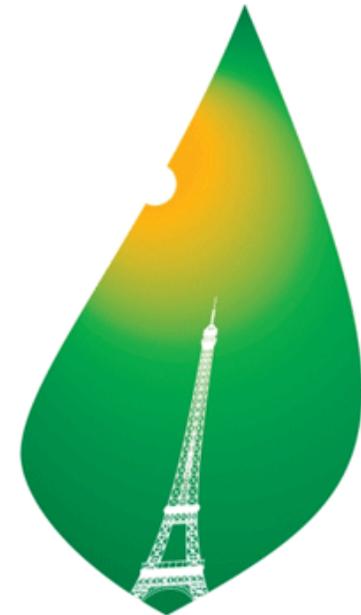
Nations Unies
Conférence sur les Changements Climatiques 2015

COP21/CMP11

Paris France



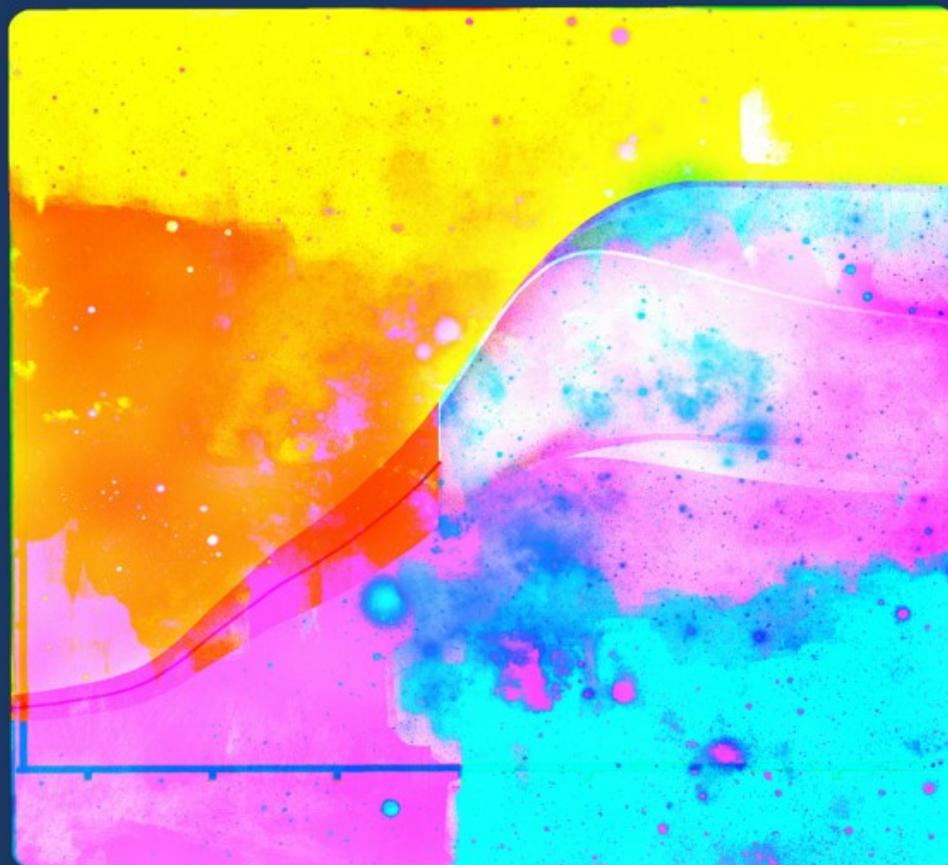
COP21 • CMP11
PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE



**Impegni per rispettare il
limite di aumento massimo
di 2 gradi entro il 2100**

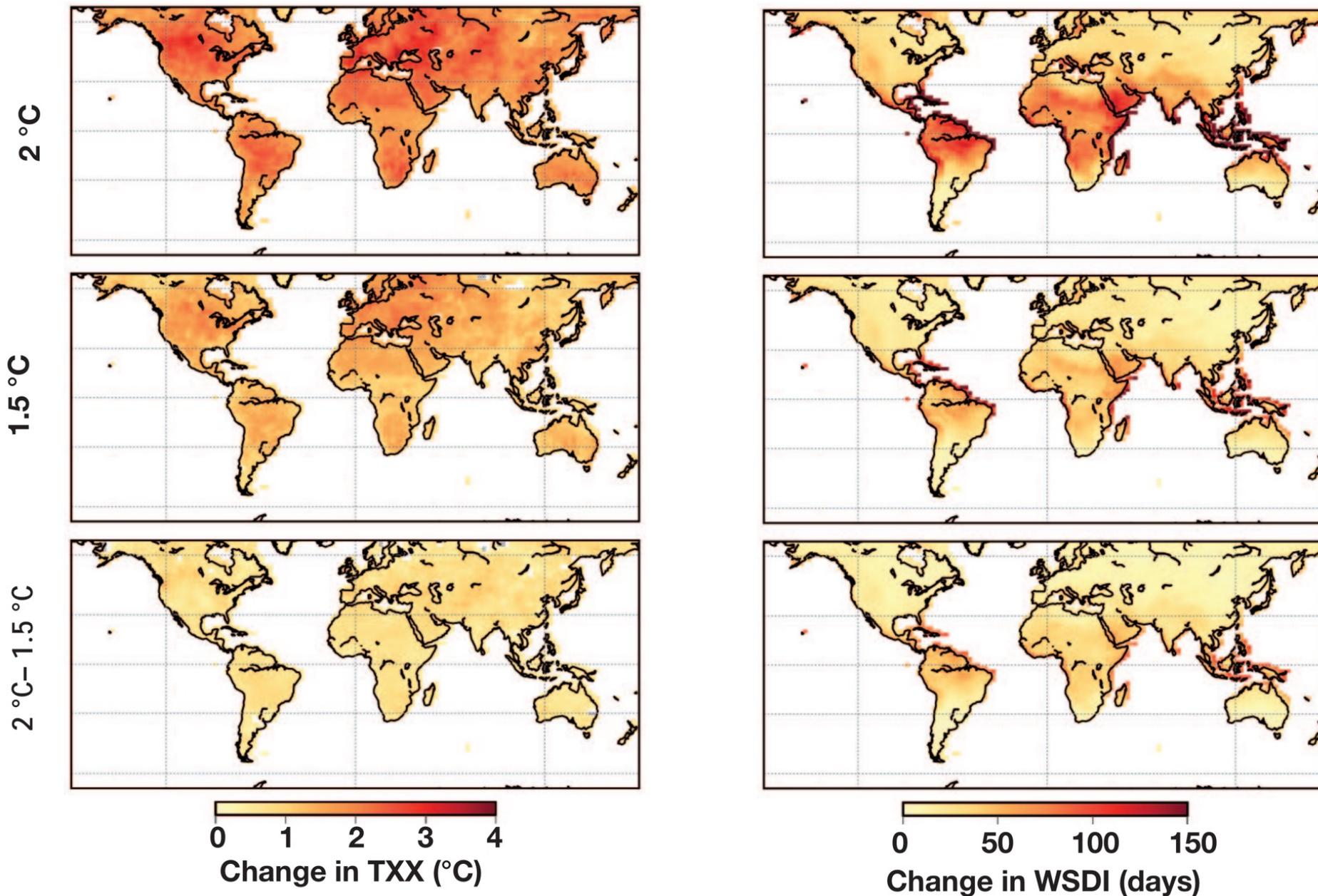
Global Warming of 1.5°C

An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.



Publicato
nel 2018

Quanto conta mezzo grado in più...





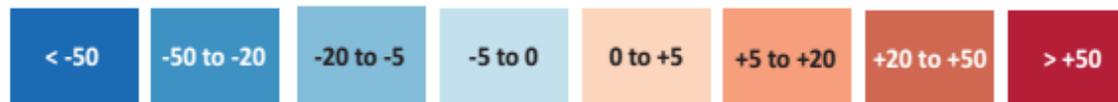
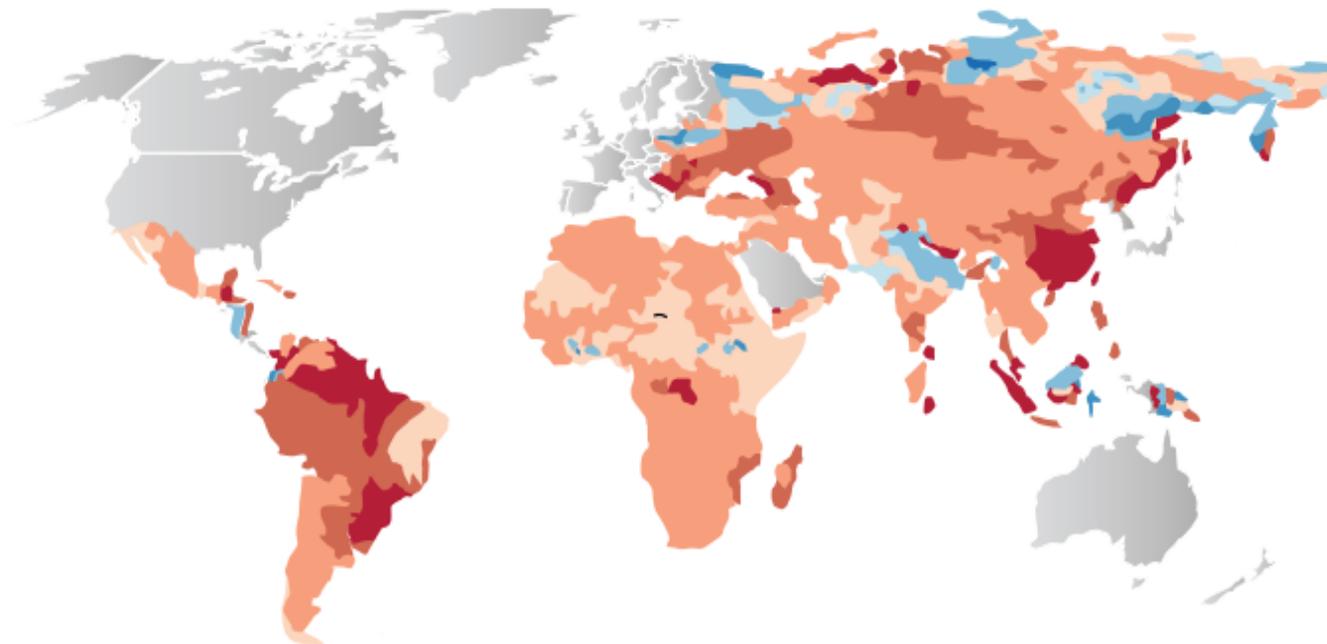
COP24 · KATOWICE 2018
UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE CONFERENCE





La crisi dell'acqua

Figure 9. Projected changes in water scarcity by 2030



Source: Water and climate change: understanding the risks and making climate-smart investment decisions - 2009
Areas in grey were not included in the model analysis. © International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. Reprinted with permission.

Migrazioni

- 166 milioni di persone si sono spostate nel periodo 2008-2013: 90% degli spostamenti sono legati a fattori climatici
- Nei prossimi decenni il cambiamento climatico porterà ad un flusso straordinario di migrazioni (fino a 250 milioni di persone), che si sommeranno a quelle per motivi economici e politici.



Il fattore età

1 - LA GIOVANE AFRICA

Paesi	Popolazione (stime Cia)
TANZANIA	51.045.882
KENYA	45.925.301
ALGERIA	39.542.166
UGANDA	37.101.745
SUDAN	36.108.853
MAROCCO + SAHARA OCC.	33.893.565
GHANA	26.327.649

MOZAMBICO	25.303.113
MADAGASCAR	23.812.681
CAMERUN	23.739.218
COSTA D'AVORIO	23.295.302
ANGOLA	19.625.353
BURKINA FASO	18.931.686
NIGER	18.045.729
MALAWI	17.964.697
MALI	16.955.536

Età media della popolazione

 	Da 15,2 a 16,7
 	da 17 a 17,9
 	da 18 a 18,8
 	da 19 a 19,9
 	da 20,1 a 28,5
 	da 31,9 a 34,4

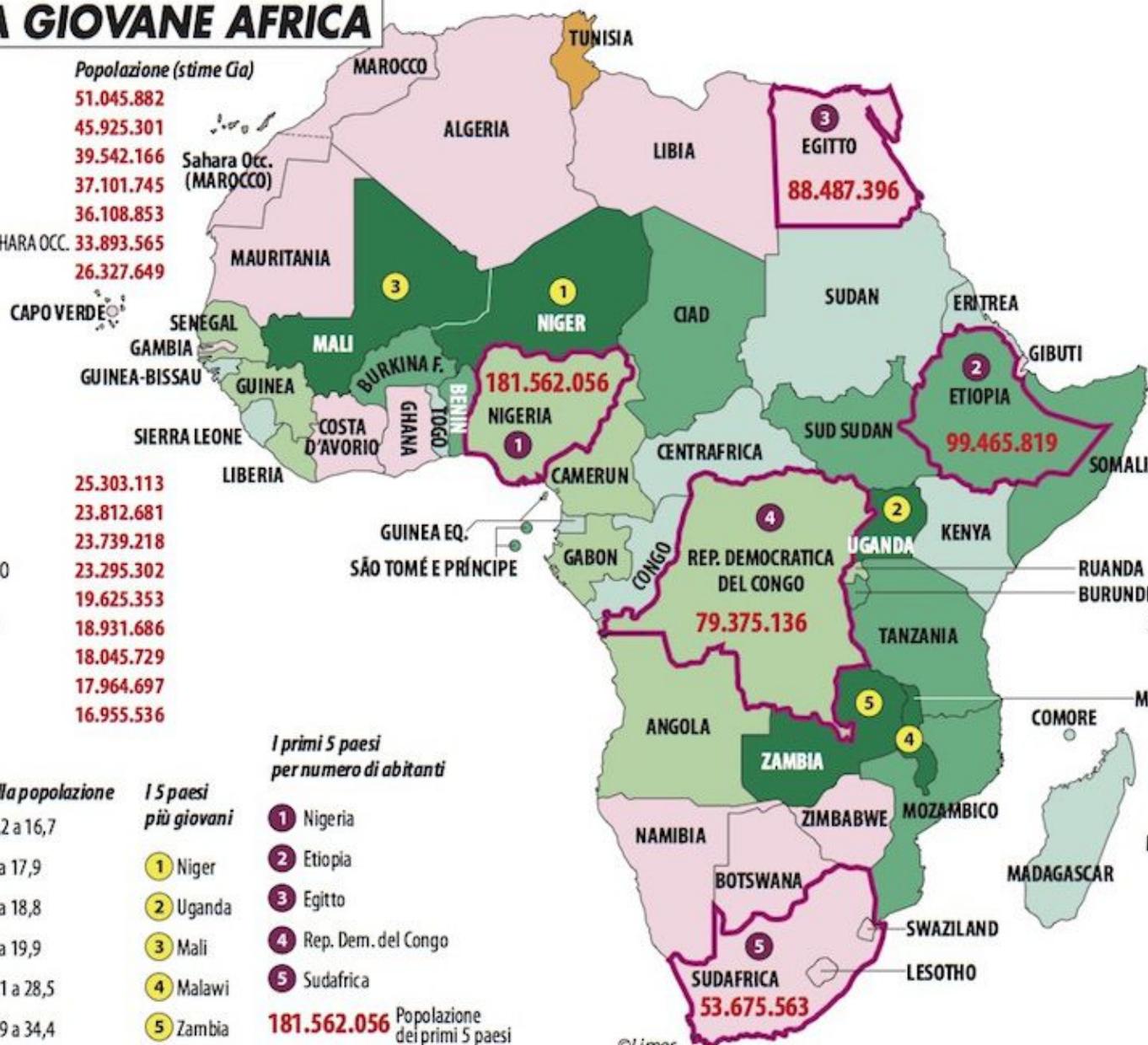
I 5 paesi più giovani

- 1 Niger
- 2 Uganda
- 3 Mali
- 4 Malawi
- 5 Zambia

I primi 5 paesi per numero di abitanti

- 1 Nigeria
- 2 Etiopia
- 3 Egitto
- 4 Rep. Dem. del Congo
- 5 Sudafrica

181.562.056 Popolazione dei primi 5 paesi



ZAMBIA	15.066.266
ZIMBABWE	14.229.541
SENEGAL	13.975.834
RUANDA	12.661.733
SUD SUDAN	12.042.910
GUINEA	11.780.162
CIAD	11.631.456
TUNISIA	11.037.225
SOMALIA	10.616.380
BURUNDI	10.742.276
BENIN	10.448.647

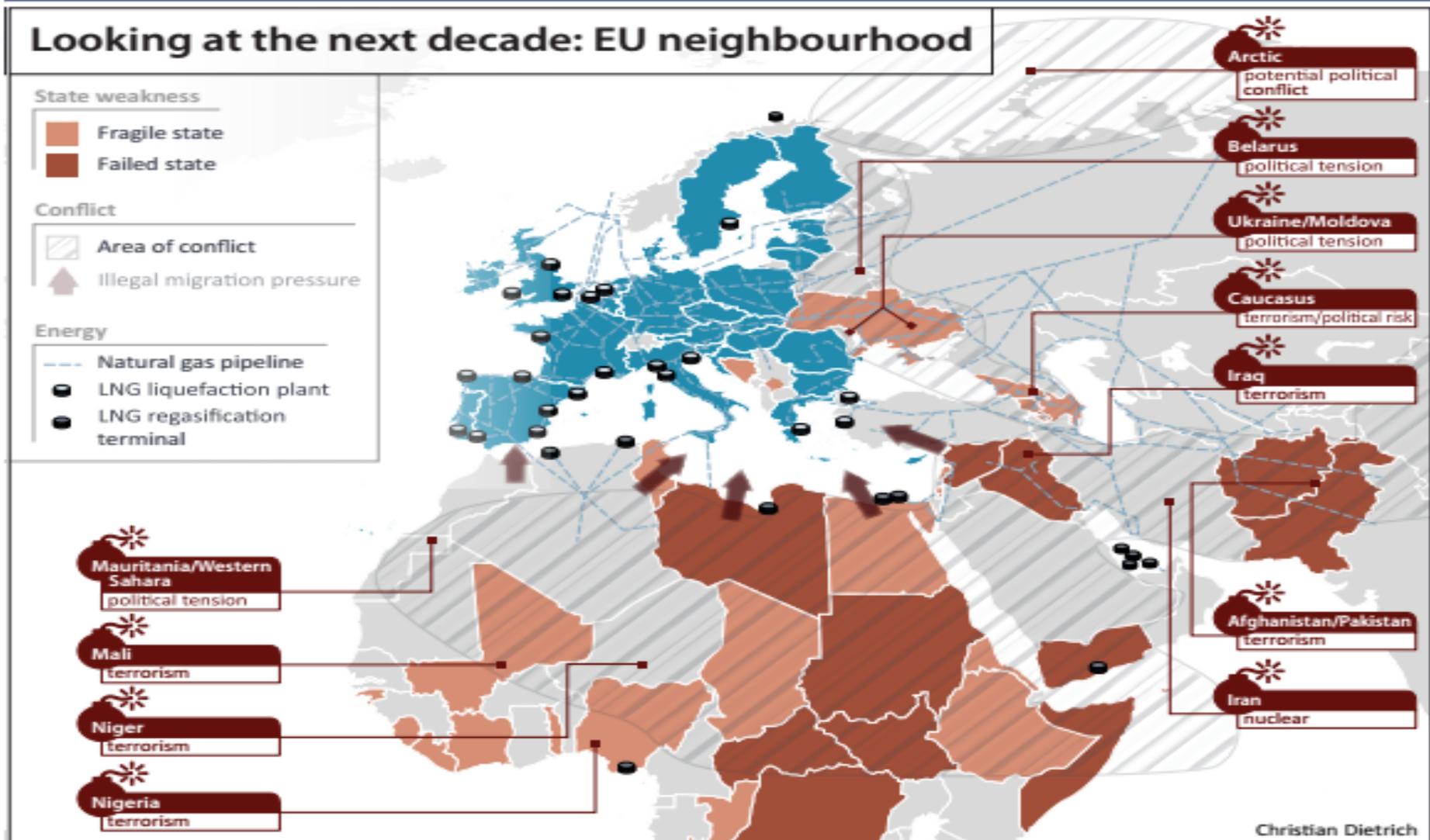
TOGO	7.552.318
ERITREA	6.527.689
LIBIA	6.411.776
SIERRA L.	5.879.098
CENTRAFRICA	5.391.539
CONGO	4.755.097
LIBERIA	4.195.666
MAURITANIA	3.596.702
NAMIBIA	2.121.307
BOTSWANA	2.182.719

GAMBIA	1.967.709
LESOTHO	1.947.701
GUINEA B.	1.726.170
GABON	1.705.336
SWAZILAND	1.435.613
MAURIZIO	1.339.827
GIBUTI	828.324
COMORE	780.971
GUINEA EQ.	740.743
CAPO VERDE	545.993
SÃO TOMÉ E PR.	194.006
SEICELLE	92.430

©Limes

Un mondo instabile

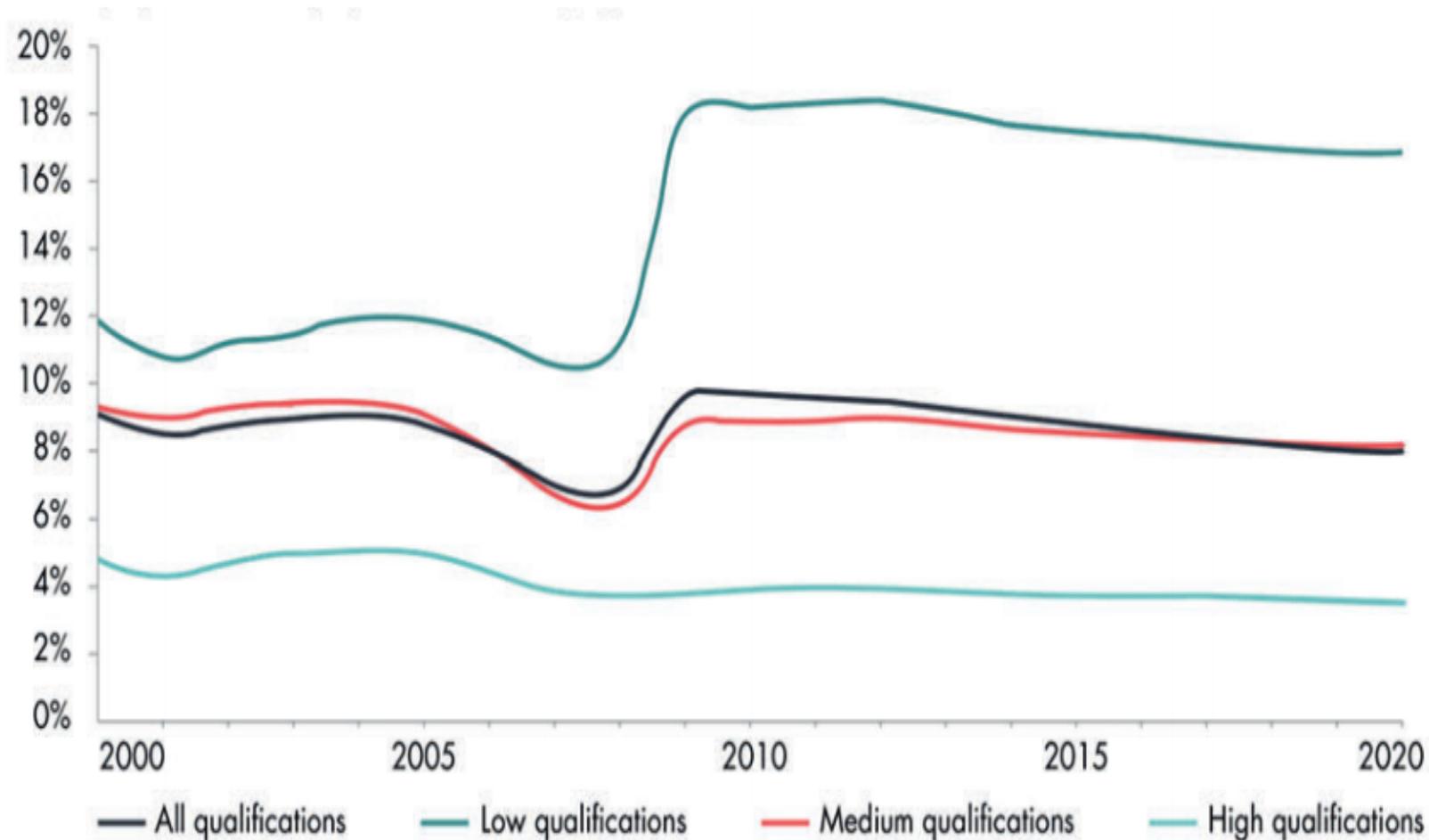
Figure 26. Looking at the next decade: European Union neighbourhood



Data: based notably on OECD Fragile State 2014; World Bank Fragile and Conflict Affected Situations List (FY14) (PDF); Fund for Peace "Failed States 2014"; and "Failed States: A Paradigm Revived" Robert I. Rotberg, Mar 11 2014

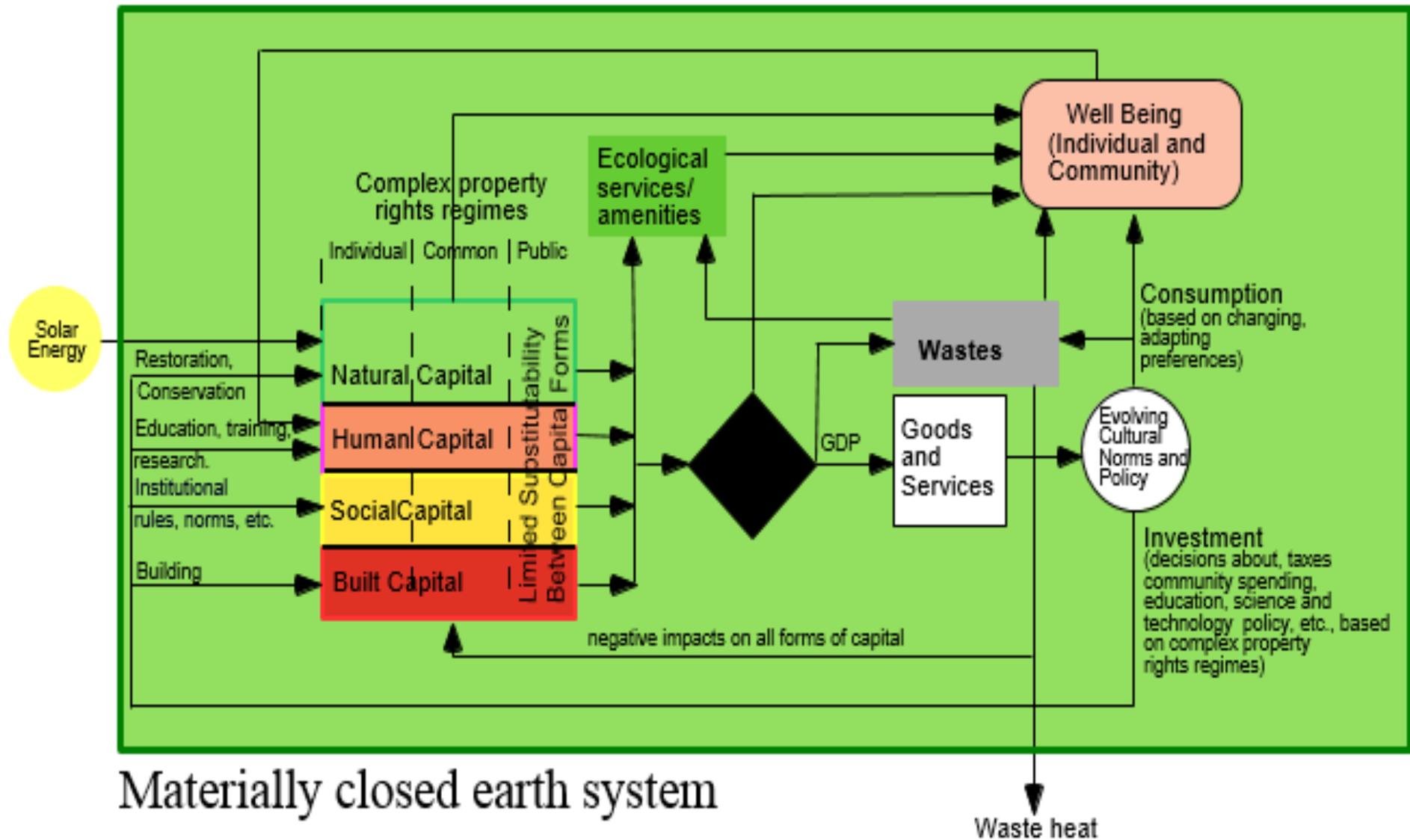
Disoccupazione e crescita della diseguaglianza economica e sociale

Figure 22. Unemployment rates by qualification category in the EU, 2000-2020



Source: Cedefop, *Skills supply and demand in Europe: Medium-term forecast up to 2020*, April 2010 (IER estimates based on E3ME, EDMOD and BALMOD).

Il sistema “mondo”



Materially closed earth system

L'attuale modello di sviluppo non è sostenibile

Siamo ad un bivio storico e la direzione che prenderemo determinerà il successo o il fallimento. Con un'economia globalizzata e tecnologie sofisticate possiamo decidere di chiudere l'epoca della povertà estrema e della fame. O possiamo continuare a **degradare il nostro pianeta** e accettare **intollerabili diseguaglianze** che generano l'amarezza e la disperazione. La nostra ambizione è di raggiungere lo sviluppo sostenibile per tutti.

Ban Ki-moon, Segretario Generale dell'ONU



Non ci sono due crisi separate, una ambientale e un'altra sociale, bensì una sola e complessa crisi socio-ambientale. Le direttrici per la soluzione richiedono un approccio integrale per combattere la povertà, per restituire la dignità agli esclusi e nello stesso tempo per prendersi cura della natura.

Papa Francesco, enciclica "Laudato si"



L'Agenda 2030 dell'ONU



17 obiettivi (SDG)

Sustainable Development Goals



