

CONVEGNO "CLIMA, ENERGIA, SOCIETA'"
Aula Magna CNR – P.le Aldo Moro, 7 – ROMA
13 e 14 ottobre 2009

"Dinamica e controllo del Sistema Clima-Energia"

Relazione del Prof. Agostino Mathis (*)

Sommario

Vengono introdotti i concetti che stanno alla base della analisi dinamica dei sistemi, ed in particolare del clima, tenendo conto dei più recenti studi sulla storia del clima (paleoclimatologia). Negli ultimi anni molti studi e rilevazioni sperimentali hanno confermato il ruolo cruciale svolto dai gas ad effetto-serra, ed in particolare dalla anidride carbonica (CO₂), nel determinare l'evoluzione delle variabili climatiche, ivi comprese possibili destabilizzazioni rapide verso nuovi stati di equilibrio. Appare poi chiaro che da almeno un secolo, ma probabilmente già da qualche millennio, l'Uomo ha cominciato a condizionare in misura sensibile l'evoluzione del clima del Pianeta Terra: alcuni climatologi propongono allora di denominare "Antropocene" l'attuale periodo della storia geologica del Pianeta Terra. Per il XXI secolo appena iniziato, viene poi delineato lo scenario delle possibili alternative di sviluppo tecnologico dell'umanità e dei conseguenti impatti sulle risorse e sul clima del Pianeta Terra. Tenuto conto delle più recenti ipotesi sull'effetto-serra, si individuano le sfide globali che l'umanità, e soprattutto i paesi più sviluppati, dovranno affrontare nei prossimi decenni: in particolare, la probabile inevitabilità di interventi diretti sul clima (Climate Engineering).

(*) **Prof. Agostino Mathis** – Via Bertero, 61 – 00156 ROMA (Italy) - Cell. 3381901198
c/o ENEA, Centro Ricerche Casaccia – Via Anguillarese, 301 – 00123 ROMA (Italy)
Tel.: ++39-06-3048-6540; Fax: ++39-06-3048-3176; Email: amathisit@yahoo.com

Introduzione

Premetto di non essere un climatologo, ma un ingegnere (elettrotecnico, poi anche nucleare). In seguito ho conseguito la libera docenza in Controlli Automatici, ed ho tenuto corsi di modellistica, simulazione, e sistemi di regolazione e sicurezza, in particolare per ingegneri nucleari. Il mio interesse per i modelli climatologici nasce circa 15 anni fa, quando con Nicola Cabibbo, allora Presidente dell'ENEA, ci siamo impegnati ad allargare l'ambito di applicazione del supercalcolatore APE, anche nel campo della dinamica del clima.

La mia visione sull'argomento in oggetto è quindi essenzialmente quella di un ingegnere: come è noto, un ingegnere spesso è costretto ad affrontare (e possibilmente risolvere) complessi problemi fisici anche se privi di una completa e rigorosa formulazione matematica (ad esempio, problemi di questo tipo, molto comuni, riguardano la termofluidodinamica di un motore a combustione interna, o i processi chimico-fisici di un altoforno).

Il Sistema Clima rientra senz'altro in questa categoria di fenomeni tuttora non descrivibili da una adeguata formulazione matematica, ma è tuttavia indispensabile procedere al più presto ad una sua soddisfacente modellizzazione e simulazione. La disponibilità di adeguati strumenti di simulazione infatti dovrà permettere, in primo luogo, di prevedere le possibili tendenze evolutive del clima tenendo conto degli effetti antropici, ma poi anche di procedere, nel prossimo futuro, allo studio ed alla sperimentazione di tutti i mezzi in grado di fronteggiare le conseguenze dell'effetto-serra. Queste problematiche si possono ritenere oggetto di una disciplina denominata *Geoengineering* (un capitolo della quale è la *Climate Engineering*). In sostanza, si tratta di considerare il "globo terracqueo", costituente il Pianeta Terra, come un "ambiente" da "climatizzare" con le più evolute ed efficienti tecnologie dell'ingegneria termofluidodinamica.

L'analisi dinamica di un sistema

L'analisi quantitativa del comportamento dinamico di un sistema complesso richiede di norma la formulazione di un adeguato modello matematico.

Un modello matematico è una descrizione della struttura e del comportamento di un sistema, nello spazio e nel tempo, che fa uso solo di simboli matematici. Le grandezze caratteristiche di un modello si distinguono nelle seguenti classi:

variabili, che descrivono il comportamento, nello spazio e nel tempo, delle grandezze fisiche che caratterizzano il sistema;

parametri, che descrivono la struttura fisica del sistema (anch'essi, di norma, possono essere variati).

Secondo la definizione di P. Eykhoff, uno dei padri della modellistica, ai nostri fini un modello consiste in "una rappresentazione degli aspetti essenziali di un sistema esistente o in progetto, che provveda l'informazione riguardo a quel sistema in una forma usabile".

Il modello matematico di un sistema può servire ai seguenti scopi:

- trasmettere ad altri le informazioni acquisite sulla struttura e sul comportamento del sistema;
- formulare e risolvere problemi, ed in particolare:
 - capire il sistema (scopo *euristico*);
 - ottimizzare il sistema (scopo *progettuale*);
 - regolare il sistema (scopo *controllistico*).

Almeno per ora, nel caso del clima lo scopo è essenzialmente quello *euristico*: capire come funziona il sistema.

Qualunque sia la natura del modello, la sua struttura può rispecchiare o meno i meccanismi secondo cui opera il sistema:

- nel secondo caso, il modello è tenuto soltanto a fornire un comportamento verso l'esterno equivalente a quello del sistema (per quanto riguarda la finalità del lavoro), mentre la sua struttura può essere quella più confacente alle tecniche realizzative disponibili (*identificazione dall'esterno*);
- nel primo caso, invece, si presuppone una conoscenza teorica o sperimentale, almeno parziale, dei fenomeni che si svolgono nel sistema: la scelta dei fenomeni da tenere in conto, ed il grado di dettaglio nella loro descrizione, dipendono dai fini del modello e dalle tecniche disponibili per la loro realizzazione (*identificazione dall'interno*).

L'identificazione dall'interno è la più opportuna se lo scopo del modello è euristico, come in questo caso riguardante il clima. Essa può procedere secondo lo schema riportato in fig. 1, dove per ogni variabile viene anche fornito il significato per lo specifico caso del clima.

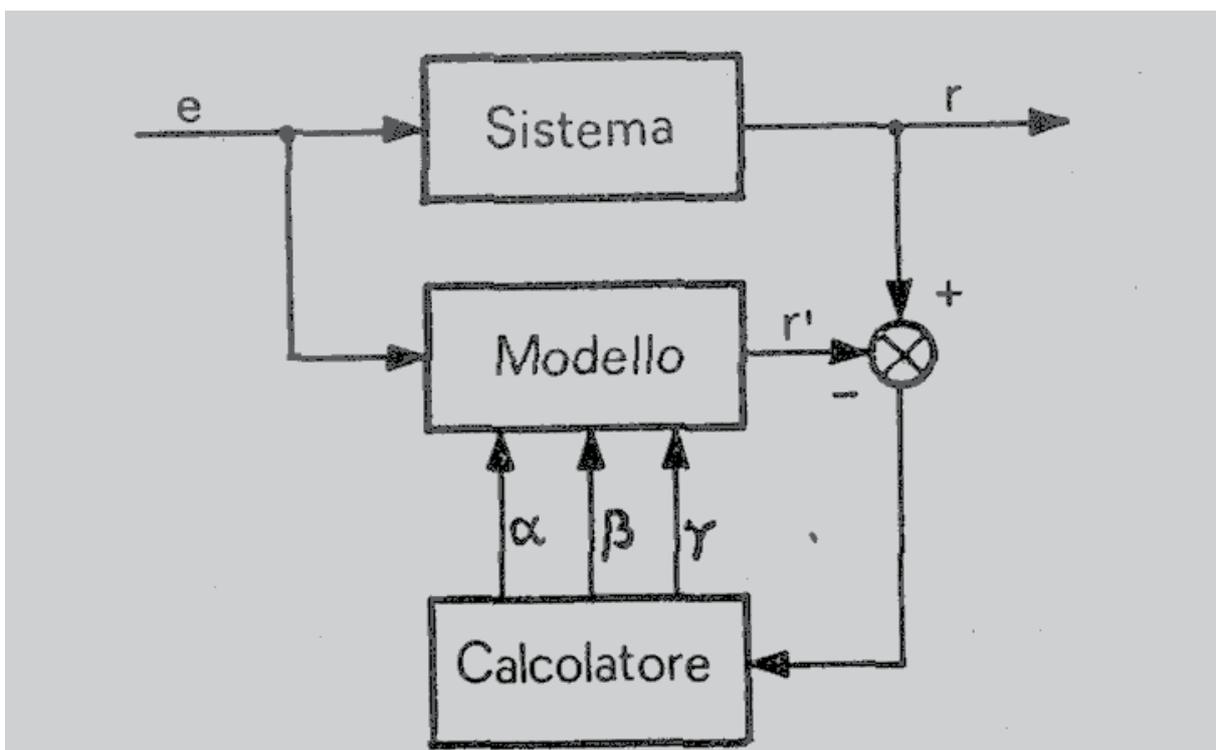


Fig.1 - Identificazione dall'interno per il Sistema Clima:

e, forzanti note (es., forzanti sull'insolazione dovute ad assetto e orbita della Terra);

r, risposta del sistema (es., storia del clima desunta da sedimenti marini e glaciali);

r', risposta del modello (es., variabili climatologiche fornite dal modello);

alfa, beta, gamma, parametri del modello da ottimizzare.

Se il sistema da studiare fosse "maneggiabile" dal ricercatore, le variabili forzanti potrebbero essere scelte tra quelle più efficienti per mettere in luce le proprietà dinamiche dello stesso, ad es. impulsi, gradini, sinusoidi di varia frequenza. Ciò può valere ad es. per un processo industriale, ma non certo per il clima della Terra. In questo caso, tuttavia, si può fare riferimento alla "cronistoria" del passato, divenuta sempre più raffinata grazie ai progressi della geologia, della paleontologia, ed in particolare della paleoclimatologia.

La identificazione procede per iterazioni, cercando i valori dei parametri che minimizzano la differenza tra la risposta del sistema e quella del modello. Il risultato sarà un "modello", costituito da correlazioni matematiche tra variabili e parametri, e realizzato su un calcolatore di adeguata potenza. In generale, il modello potrà contenere relazioni non-lineari e catene di retroazione, di estrema importanza nella simulazione del clima.

In qualche caso, tuttavia, alcuni comportamenti del sistema possono essere anche studiati, in ambiti di comportamento lineare, descrivendo le correlazioni tra le variabili significative mediante "funzioni di trasferimento", cioè funzioni analitiche nella frequenza complessa che definiscono i "guadagni" e le "costanti di tempo" che caratterizzano la risposta delle variabili in uscita del sistema ad una data eccitazione nelle variabili di ingresso. Mediante le funzioni di trasferimento diviene allora molto più agevole valutare i campi di stabilità ed i tipi di risposta di un sistema dinamico, ed eventualmente anche definirne opportune strategie di controllo.

L'introduzione di questi metodi di analisi dinamica dei sistemi appare di particolare utilità ed urgenza per migliorare l'affidabilità degli studi sui cambiamenti climatici e delle politiche per fronteggiarli, in quanto spesso quegli studi non tengono adeguatamente conto della "dinamicità" dei sistemi in esame, e tendono a fare riferimento a correlazioni "statiche" tra variabili (caso tipico: il rapporto tra l'aumento della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera e l'aumento della temperatura media superficiale del Pianeta).

La "cronistoria" del clima della Terra

Dallo studio accurato di antichissimi reperti geologici, appare probabile che la Terra abbia attraversato lunghe fasi di glaciazione completa o quasi (*snowball Earth* o *slushball Earth*), in particolare all'inizio ed alla fine dell'Era Proterozoica (che va da 2200 a 600 milioni di anni fa) (Allen, 2006; Fairchild and Kennedy, 2007; Chumakov, 2008). In fig. 2, tratta dal sito "Snowball Earth" (<http://www.snowballearth.org/>), sono riportate queste fasi, durate anche più di 10 milioni di anni ciascuna, oltre a numerose altre glaciazioni, più brevi e probabilmente di carattere regionale (come quella in cui attualmente viviamo).

Le cause delle situazioni di glaciazione completa o quasi non sono assodate, anche se si fanno ipotesi quali lunghi periodi di ridotta attività vulcanica e conseguente forte riduzione della concentrazione di anidride carbonica (CO₂), assorbita per corrosione dei silicati, e del conseguente effetto-serra, oppure l'attraversamento di zone ad alta luminosità della nostra galassia, la Via Lattea, da parte del Sistema Solare, e conseguente alto flusso di raggi cosmici nell'atmosfera terrestre, i quali favoriscono la formazione di nubi basse che aumentano l'albedo del Pianeta (v. anche più avanti).

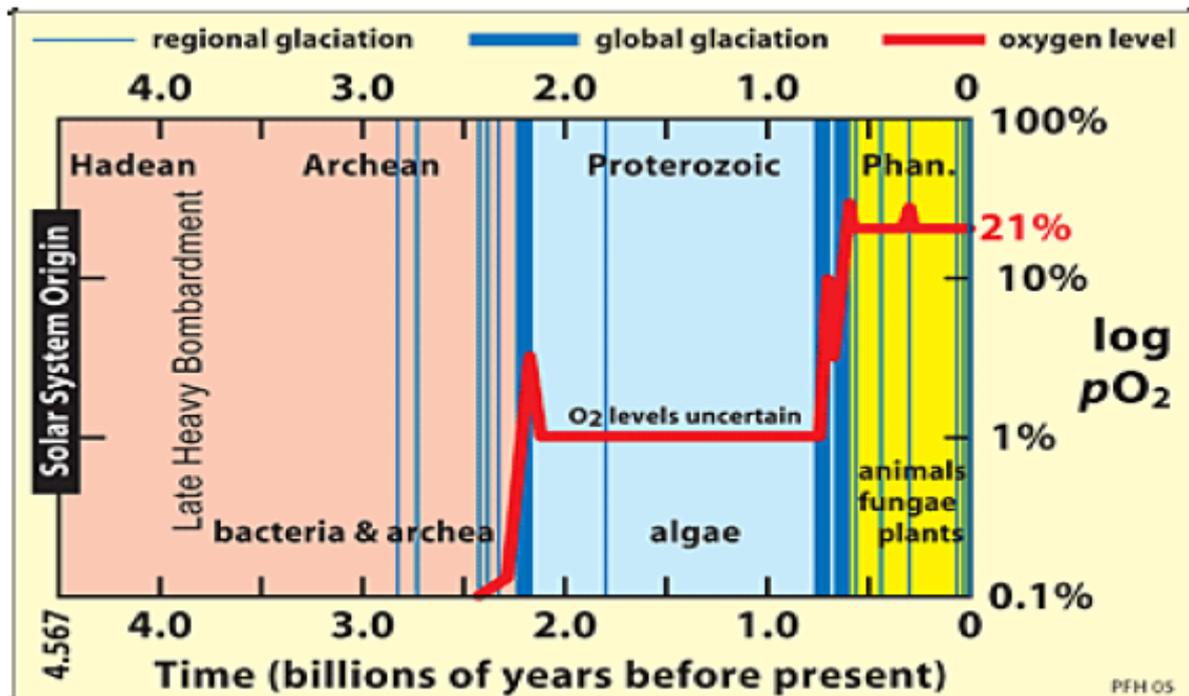


Fig. 2 – Cronistoria delle glaciazioni dalle origini del Pianeta Terra (oltre 4500 milioni di anni fa). (Dal sito "Snowball Earth": <http://www.snowballearth.org/>).

In ogni caso, una situazione di glaciazione completa sarebbe estremamente stabile, a causa della altissima albedo delle superfici coperte da ghiaccio o neve (dove oltre il 50% della radiazione solare incidente viene riflessa nello spazio) e temperature superficiali tra -20°C e -50°C : si pone allora il problema di come il Pianeta abbia potuto ritornare a condizioni "normali". Le ipotesi per ora più convincenti riguardano la crescita ad altissimi livelli delle concentrazioni di gas ad effetto-serra, come la CO_2 , emessa dai vulcani e non assorbita a causa della quasi completa assenza di fotosintesi o di corrosione dei silicati, o il metano, liberato in enormi quantità per decomposizione dei clatrati sottomarini (Kennedy et al., 2008).

A queste fasi di glaciazione (*icehouse*), come si vede dalla fig. 2, si sono alternate lunghe fasi di *hothouse*, o *greenhouse*, durante le quali il Pianeta è stato praticamente privo di ghiacci anche ai poli, e gli oceani erano tiepidi anche in profondità.

Esaminiamo allora la cronistoria del clima a partire dall'ultima fase di *greenhouse*: come si vede dalla fig. 3, dopo il *Climatic Optimum* del primo Eocene circa 50 milioni di anni fa (forse dovuto, come il *Late Paleocene Thermal Maximum*, alla immissione in atmosfera di enormi quantità di metano per decomposizione dei clatrati sottomarini), la tendenza è stata quella di un sostanziale raffreddamento, che si è fortemente aggravato negli ultimi pochi milioni di anni, con un comportamento che appare sempre più instabile (Zachos et al., 2001).

Dalle barre verticali della figura, che indicano la presenza di ghiacci permanenti ai poli, si può anche desumere che un così profondo cambiamento climatico del

Pianeta, dopo decine di milioni di anni di clima subtropicale (e oceani tiepidi anche in profondità), sia stato innescato dalla deriva dei continenti con l'arrivo al Polo Sud del continente antartico, che gradualmente si coprì di ghiaccio e raffreddò tutte le profondità oceaniche.

Tuttavia, si può anche citare l'ipotesi avanzata negli ultimi anni dal Center for Sun-Climate Research presso il Danish National Space Center, e cioè la connessione tra le variazioni nell'intensità dei raggi cosmici ed i cambiamenti climatici: il nuovo campo di ricerca è stato chiamato "cosmoclimatologia" (Svensmark, 2007; Carlslaw, 2009). I raggi cosmici, infatti, ionizzano l'atmosfera e possono favorire la produzione di aerosol che a loro volta fanno da precursori nella formazione delle nuvole, in particolare di quelle a bassa quota che raffreddano il clima per riflessione della radiazione solare incidente.

Su scale dei tempi molto lunghe, l'intensità dei raggi cosmici varia anche di molto a causa delle diverse zone di Galassia in cui si viene a trovare il Sistema Solare. Come già fatto cenno, durante la sua storia la Terra ha attraversato diverse fasi di *hothouse* ed altre di *icehouse* (come quella in cui ora ci troviamo). Le fasi di *icehouse* si verificherebbero allora quando il Sistema Solare incontra bracci di spirale molto luminosi, dove i raggi cosmici sono più intensi. In particolare, eventi di netto raffreddamento si verificherebbero quando, ogni 30-40 milioni di anni, il Sistema Solare attraversa il piano intermedio della Galassia, come è avvenuto ad es. nella transizione tra Eocene e Oligocene. L'attività solare, poi, con i cicli delle "macchie solari", potrebbe influenzare l'effetto dei raggi cosmici: un suo aumento, infatti, come avvenuto nel corso del XX secolo, aumenta il campo magnetico solare che scherma la Terra dai raggi cosmici, riducendo quindi anche la formazione di nubi a bassa quota.

L'attenzione dei climatologi e dei politici, tuttavia, si rivolge ora al futuro del clima nel corso del secolo attuale e dei pochi successivi. In questa prospettiva, quindi, si possono non considerare da un lato gli effetti di forzanti di lunghissimo periodo come la deriva dei continenti e la localizzazione del Sistema Solare nella Galassia, mentre d'altro lato l'effetto dell'attività solare, che comunque appare limitato, ha un andamento difficilmente prevedibile e deve quindi essere considerato come un "disturbo" sovrainposto all'andamento a lungo termine. Per arrivare a modelli dinamici del clima utili ai nostri fini, si tratta allora di approfondire la "cronistoria" più vicina a noi, su periodi più brevi rispetto a quelli prima citati.

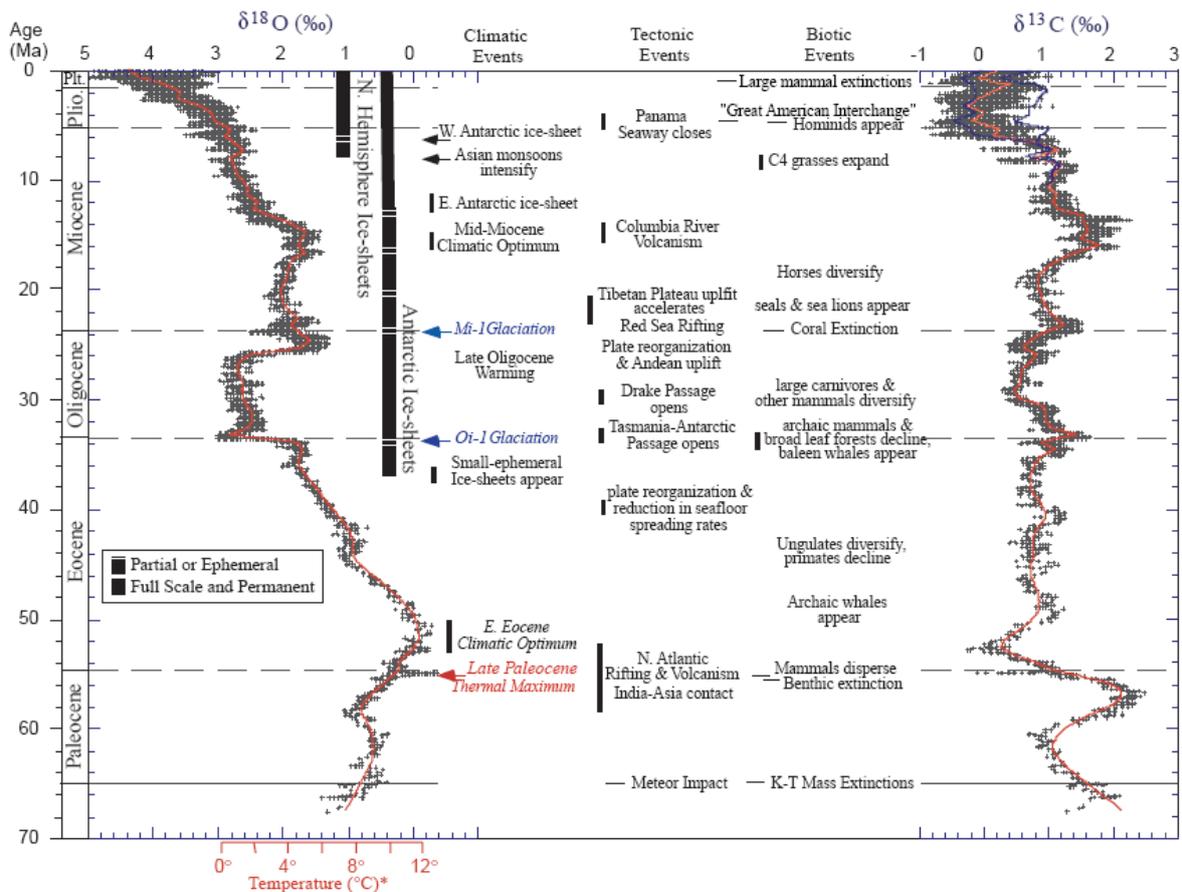


Fig. 2. Global deep-sea oxygen and carbon isotope records based on data compiled from more than 40 DSDP and ODP sites (36). The sedimentary sections from which these data were generated are classified as pelagic (e.g., from depths >1000 m) with lithologies that are predominantly fine-grained, carbonate-rich (>50%) oozes or chalks. Most of the data are derived from analyses of two common and long-lived benthic taxa, *Cibicidoides* and *Nuttallides*. To correct for genus-specific isotope vital effects, the $\delta^{18}\text{O}$ values were adjusted by +0.64 and +0.4‰ (124), respectively. The absolute ages are relative to the standard GPTS (36, 37). The raw data were smoothed using a five-point running mean, and curve-fitted with a locally weighted mean. With the carbon isotope record, separate curve fits were derived for the Atlantic (blue) and Pacific above the middle Miocene to illustrate the increase in basin-to-basin

fractionation that exceeds $\sim 1.0\text{‰}$ in some intervals. Prior to 15 Ma, interbasin gradients are insignificant or nonexistent (39). The $\delta^{18}\text{O}$ temperature scale was computed for an ice-free ocean [$\sim 1.2\text{‰}$ Standard Mean Ocean Water (SMOW)], and thus only applies to the time preceding the onset of large-scale glaciation on Antarctica (~ 35 Ma) (43). From the early Oligocene to present, much of the variability ($\sim 70\%$) in the $\delta^{18}\text{O}$ record reflects changes in Antarctica and Northern Hemisphere ice volume (40). The vertical bars provide a rough qualitative representation of ice volume in each hemisphere relative to the LGM, with the dashed bar representing periods of minimal ice coverage ($\approx 50\%$), and the full bar representing close to maximum ice coverage ($> 50\%$ of present). Some key tectonic and biotic events are listed as well (4, 5, 35).

Fig. 3 – Cronistoria del clima per gli ultimi 60 milioni di anni ricavata da analisi isotopiche di sedimenti marini. (Da: J. Zachos et al. "Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present" *Science*, Vol. 292, pp. 686-693 - 27 April 2001).

Venendo allora al nostro ultimo milione di anni (l'ultimo breve tratto in alto di fig. 3, corrispondente all'Olocene ed a parte del Pleistocene), la conoscenza della storia del clima si fa molto più raffinata, grazie soprattutto ai carotaggi di ghiaccio effettuati negli ultimi anni in Groenlandia ed in Antartide (EPICA community members, 2004). Dalla fig. 4, tratta dal 4° Rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007a), risulta evidente che il clima ha assunto un comportamento oscillatorio persistente fortemente non-lineare, ben noto agli ingegneri dei controlli automatici (che lo chiamano "ciclo-limite", e tendono comunque ad eliminarlo, in quanto grave causa di usura dei sistemi di regolazione e di degrado delle prestazioni).

L'analisi in frequenza di questo comportamento oscillatorio dimostra una chiara correlazione tra le forzanti astronomiche (che determinano l'insolazione) e la dinamica della criosfera (cioè delle calotte glaciali e dei ghiacci marini), mentre altre possibili forzanti appaiono secondarie su questa scala temporale. I ritmi di fondo di questo comportamento del clima, specie nell'ultimo mezzo milione di anni, appaiono infatti chiaramente correlati alle forzanti astronomiche conseguenti ai movimenti del Pianeta Terra rispetto al Sole (con periodi di circa 100.000 anni per l'eccentricità dell'orbita terrestre, 40.000 anni per l'obliquità dell'asse terrestre rispetto al piano dell'eclittica, e 20.000 anni per la precessione degli equinozi), confermando così la teoria esposta dal matematico serbo Milutin Milankovitch fin dal 1941 (peraltro sulla base di ipotesi già avanzate da Adhemar nel 1842 e da Croll nel 1875).

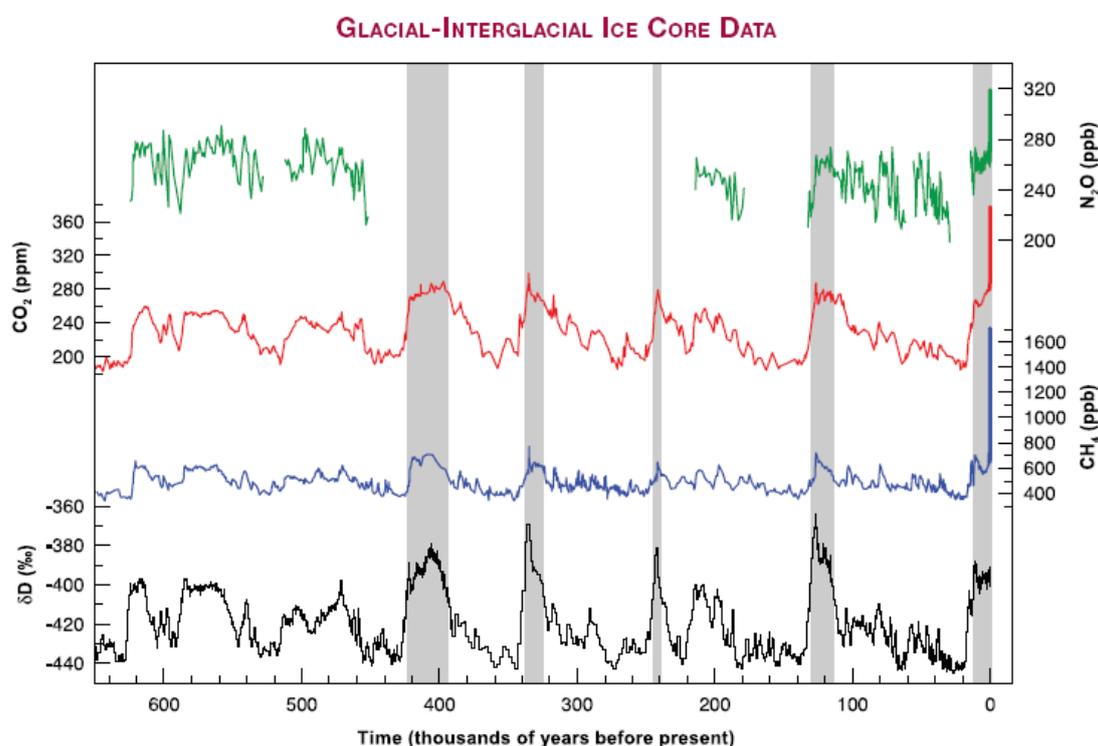


Figure TS.1. Variations of deuterium (δD) in antarctic ice, which is a proxy for local temperature, and the atmospheric concentrations of the greenhouse gases carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and nitrous oxide (N_2O) in air trapped within the ice cores and from recent atmospheric measurements. Data cover 650,000 years and the shaded bands indicate current and previous interglacial warm periods. {Adapted from Figure 6.3}

Fig. 4 – Alternanza di periodi glaciali ed interglaciali durante l'ultimo milione di anni. (Da: IPCC "Climate Change 2007 – The Physical Science Basis - Technical Summary – TS.2 Changes in Human and Natural Drivers of Climate – TS.2.1 Greenhouse Gases – TS.2.1.1 Changes in Atmospheric Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide" <http://www.ipcc.ch/>).

Tuttavia, sull'andamento "di fondo" è sovrapposto un forte "rumore", dovuto ad un gran numero di effetti secondari non necessariamente casuali, ma caratterizzati da "caos deterministico", e quindi praticamente imprevedibili (oscillazioni di Dansgaard-Oeschger, in controfase tra Artide ed Antartide, dovute alla riorganizzazione delle correnti oceaniche; eventi di Heinrich, dovuti allo sfaldamento periodico delle imponenti calotte glaciali del Nord America e del

Nord Europa; attività solare; eruzioni vulcaniche, che possono ridurre la temperatura in misura sensibile anche per diversi anni, come è avvenuto dopo l'eruzione del Pinatubo nel 1991).

Nella fig. 4 sono poi da notare, all'estrema destra dei diagrammi, gli incrementi delle concentrazioni dei gas ad effetto-serra (anidride carbonica: CO₂; metano: CH₄; ossido di azoto: N₂O), verificatisi negli ultimi decenni, che appaiono del tutto eccezionali per entità e rapidità rispetto alla storia del clima negli ultimi milioni di anni.

L'identificazione di un modello del clima per l'ultimo milione di anni

Nella fig. 4 con banda grigia sono indicati gli ultimi cinque periodi interglaciali, tra cui quello in cui stiamo vivendo: come si vede, il nostro non è il più caldo, ma è forse il più regolare, anche se con una lieve tendenza verso il raffreddamento (e si può ritenere che questo comportamento abbia favorito negli ultimi 10.000 anni lo sviluppo delle civiltà umane agricole e stanziali).

Tipicamente, un interglaciale inizia con un rapidissimo aumento di temperatura, seguito da un graduale, anche se irregolare, raffreddamento fino ad un nuovo minimo al termine del successivo periodo glaciale. Anche le notevoli oscillazioni presenti durante i periodi glaciali (oscillazioni di Dansgaard-Oeschger, eventi di Heinrich) presentano un analogo andamento, benché su scale di tempo più brevi. Si tratta, come si vede, di caratteristici "denti di sega" (lento accumulo di ghiacci, seguito da rapide deglaciamenti). Questo comportamento può essere attribuito alla peculiare non-linearità della criosfera: *le calotte glaciali, infatti, non possono crescere più rapidamente di quanto permesso dal regime delle precipitazioni, mentre possono sparire anche molto velocemente quando ricevano un adeguato flusso di entalpia.*

Se si applicano ad un tradizionale modello climatologico le sole, ben note, forzanti astronomiche, si ottengono andamenti con le stesse, corrette, frequenze di base, ma di forma molto più arrotondata rispetto alle registrazioni sperimentali riportate in fig. 4. E' quindi essenziale che il modello tenga conto correttamente, oltre che delle forzanti astronomiche, anche della dinamica della criosfera e della relativa albedo, delle concentrazioni dei gas ad effetto-serra (gas-serra: naturali, e poi antropici) e delle correnti marine.

Da qualche anno, il Prof. William F. Ruddiman, della Virginia University, introducendo nei modelli anche gli effetti-serra naturali (essenzialmente anidride carbonica e metano, emessi o assorbiti da litosfera, oceani e biosfera), ha ottenuto andamenti molto più simili a quelli sperimentali, ed in particolare può spiegare l'innescò della deglaciamento con una causa prima di tipo astronomico (forte radiazione solare ad inizio estate alle alte latitudini), a cui consegue una emissione di gas-serra che in retroazione positiva accelerano il riscaldamento e la deglaciamento (Ruddiman, 2008). Questo spiega il fatto che nelle registrazioni paleoclimatiche l'anidride carbonica "segue" la temperatura, ma ovviamente non esclude, anzi presuppone, che l'anidride carbonica a sua volta sia causa di un rilevante effetto-serra.

Come noto, anche il vapor d'acqua rappresenta un importantissimo gas ad effetto-serra; occorre tuttavia osservare che, essendo il vapor d'acqua

condensabile in relazione alla temperatura atmosferica, esso non è una variabile indipendente, ma costituisce una retroazione positiva (destabilizzante) per aumenti di temperatura di qualunque origine. Anche qui, può essere utile leggere quanto afferma in merito il 4° Rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change del 2007 (IPCC, 2007b).

Il Prof. Ruddiman avanza anche l'ipotesi che già a partire da almeno ottomila anni or sono, sia pure inconsciamente, l'*Homo sapiens* abbia influito sul clima, al punto da averne finora ritardato la "naturale" tendenza verso una nuova era glaciale (e permettendo così lo sviluppo delle civiltà "storiche") (Ruddiman, 2005). Le cause poterono essere la deforestazione (mediante incendi, anche se la CO₂ così prodotta non sembrerebbe molto rilevante), e l'agricoltura e l'allevamento (in particolare, risaie e bovini, che producono molto metano, anch'esso potente gas-serra).

Da due secoli, poi, è esploso l'utilizzo dei combustibili fossili, ed anche nella fig. 4 se ne vedono gli effetti: nell'aria intrappolata negli strati di ghiaccio antartico le concentrazioni di anidride carbonica, di metano e di ossido di azoto hanno raggiunto livelli mai visti da molti milioni di anni. Si tratta quindi ora di evitare che gli effetti antropici eccedano al di là della stabilizzazione del clima, e cioè provochino un riscaldamento incontrollato dell'atmosfera e degli oceani, ed una ulteriore rilevante deglaciazione dopo quella che ha posto fine all'ultima era glaciale.

La criticità dei gas ad effetto-serra per l'evoluzione del clima

Oltre all'analisi di Ruddiman, molti altri studi e rilevazioni sperimentali hanno confermato negli ultimi anni il ruolo cruciale svolto dai gas ad effetto-serra, ed in particolare dalla CO₂, nel determinare l'evoluzione delle variabili climatiche, ivi comprese possibili destabilizzazioni rapide verso nuovi stati di equilibrio.

Una recente analisi dinamica è stata condotta per gli ultimi tre milioni di anni con un modello incentrato sulle masse glaciali, e sottoposto alle forzanti astronomiche (ben note sia per il passato che per il futuro) ed alle variazioni dei gas-serra ("storiche" per il passato, ed ipotizzate per il futuro) (Crowley and Hyde, 2008). Da tale analisi sembrerebbe che le forti instabilità climatiche verificatesi negli ultimi 400.000 anni, se fosse proseguita la "naturale" tendenza alla riduzione dei gas-serra senza l'intervento antropico, avrebbero potuto condurre in tempi geologicamente brevi ad una "biforcazione" verso un nuovo regime climatico stabile caratterizzato da una ampia calotta glaciale anche sull'emisfero Nord fino alle medie latitudini, in particolare sull'Eurasia. Sarebbe così venuto a concludersi un processo durato 50 milioni di anni, da un Pianeta privo di calotte glaciali, ad uno con calotte di dimensioni comparabili e stabili su ambedue gli emisferi.

Una bella conferma della analisi di Ruddiman si trova poi in un altro recente lavoro, dove si paragona l'attuale minimo dell'insolazione di metà giugno a 60° di latitudine Nord, a quello del tutto simile verificatosi 397.000 anni fa, e che determinò la fine di un periodo interglaciale (Mueller and Pross, 2007). Come dimostrato da una accurata analisi palinologica, a quel tempo era già avvenuta una netta riduzione di numerose specie di piante termofile anche alle nostre

latitudini: se attualmente ciò non si è verificato, il motivo potrebbe proprio risiedere negli effetti-serra antropici considerati da Ruddiman.

Un'altra conferma dell'importanza cruciale dei gas-serra, ed in particolare della CO₂, si può trovare in due altri recenti articoli, dove da una ampia mole di dati sperimentali si comincia a spiegare l'interazione tra i diversi fenomeni che hanno causato l'ultima deglaciazione (Barker et al., 2009; Severinghaus, 2009):

- le forzanti astronomiche, in particolare la obliquità dell'asse terrestre;
- le masse d'acqua dolce di fusione che causano l'interruzione dell'Atlantic Conveyor Circulation;
- il conseguente riscaldamento dell'Antartide e dell'oceano circostante che provoca un netto aumento della CO₂ su tutto il Pianeta.

Come si osserva dagli andamenti riportati nella fig. 5, a partire da 25 mila anni fa la obliquità dell'asse terrestre comincia a provocare una crescente insolazione in Giugno a 60° N; l'emisfero Nord si decongela rapidamente, anche per albedo decrescente, tra 21 e 19 mila anni fa, provocando franamenti delle calotte glaciali in mare (Heinrich events); le masse d'acqua dolce di fusione causano l'interruzione dell'Atlantic Conveyor Circulation a 18 mila anni fa; il conseguente riscaldamento dell'Antartide e dell'oceano circostante provoca un netto aumento della CO₂ su tutto il Pianeta, che continua a riscaldare l'emisfero Nord fino al caldo periodo Boelling-Allerod (iniziato circa 15 mila anni fa); a questo punto, un nuovo, potente, scarico di acque di fusione nel Nord Atlantico arresta di nuovo l'Atlantic Conveyor Circulation, e ripiomba l'emisfero Nord in un periodo glaciale di quasi un millennio (Younger Dryas, intorno a 12 mila anni fa).

In seguito, smantellate ormai intorno a 10 mila anni fa le calotte glaciali su terraferma dell'emisfero Nord, le grandi pendolazioni tra emisferi non hanno più potuto ripetersi, anche se da quasi 10 mila anni le forzanti astronomiche hanno ripreso un andamento che porta verso un nuovo raffreddamento. Questo esito finale delle oscillazioni che hanno portato all'attuale interglaciale sembra quindi derivare dal sensibile incremento della concentrazione di CO₂ proseguito per l'intera vicenda, da 180 a 250 parti per milione (in volume) (ppm). Ora però in un centinaio di anni l'Uomo ha già portato tale concentrazione a 390 ppm, valore mai raggiunto da forse 20 milioni di anni.

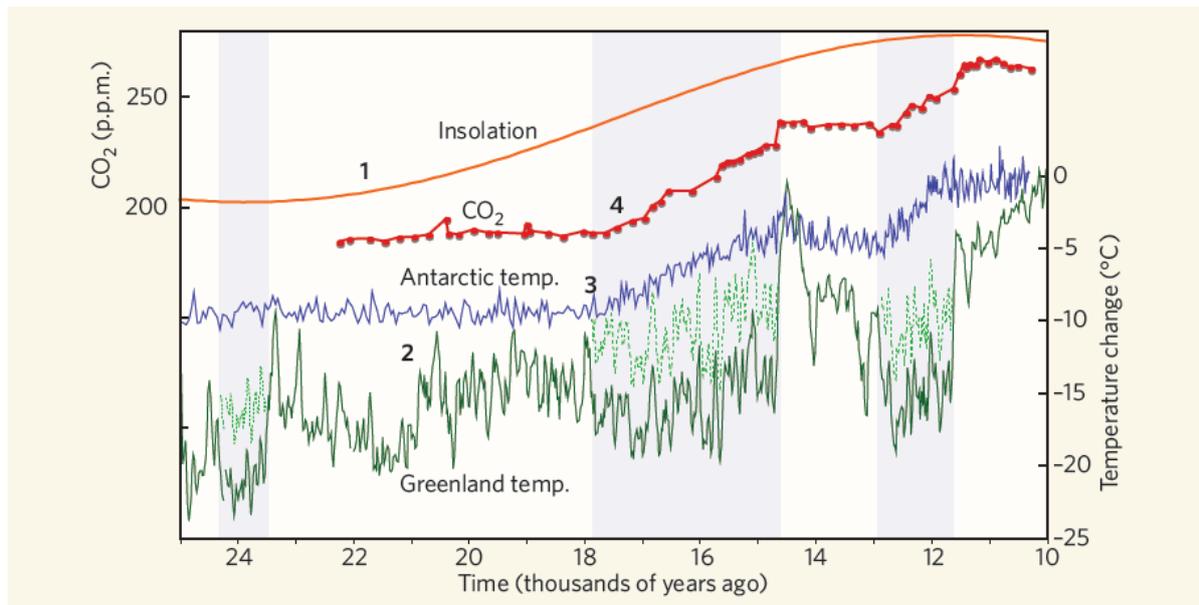


Figure 1 | Possible chain of events during the last deglaciation. **1**, Starting about 24,000 years ago, a gradual change in Earth's spin-axis produced an increase in June insolation (sunshine) at 60° N. The northern ice sheets began to retreat, decreasing the planet's reflectivity and leading to warming (as recorded in Greenland; **2**) around 21,000–19,000 years ago. The resulting meltwater caused the North Atlantic conveyor to shut off around 18,000 years ago, switching the bipolar see-saw into its 'warm south' mode (shading) and producing abrupt warming of Antarctica (**3**) and the surrounding ocean. The consequent release of CO₂ from the deep ocean led to a rise in atmospheric CO₂ that began several hundred years later (**4**) — so warming the whole planet, keeping the meltwater coming, maintaining the 'warm south' mode, and increasing CO₂ even further in a positive feedback loop^{8,9}. The upshot was destruction of the ice sheets. The Greenland temperature record is heavily influenced by winter temperature changes¹⁴, so summer temperature is shown by adding 5 °C to the record during the 'see-saw south' intervals. (Data from refs 6, 8, 16 and 17.)

Fig. 5 – Possibile catena di eventi durante l'ultima deglaciazione. (Da: J. P. Severinghaus "Southern see-saw seen" *Nature*, Vol. 457, pp. 1093-1094 - 26 February 2009).

L'Antropocene e la sua evoluzione futura

Dalla analisi precedente appare chiaro che da almeno un secolo, ma probabilmente già da qualche millennio, l'Uomo ha cominciato a condizionare in misura sensibile l'evoluzione del clima della Terra: alcuni climatologi propongono allora di denominare "Antropocene" l'attuale periodo della storia geologica del Pianeta Terra.

Nel corso del XX secolo, in particolare, la popolazione mondiale è quadruplicata e la potenza primaria da essa utilizzata si è moltiplicata per 16. In massima parte questa potenza proviene dal bruciamento di combustibili fossili, con la conseguente immissione nell'atmosfera di un crescente flusso di anidride carbonica (CO₂). La teoria dell'effetto-serra, che sarebbe provocato da questa anidride carbonica e da altri gas diffusi dall'attività umana, tra cui in particolare il metano, appare sempre più credibile via via che si vanno accumulando le osservazioni sul clima e sui biosistemi. Dall'era pre-industriale al 2008 la concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera è passata da circa 275 a

circa 385 ppm (fig. 6). Attualmente, essa sta crescendo di oltre 2 ppm/anno, e si avvicina alle 390 ppm.

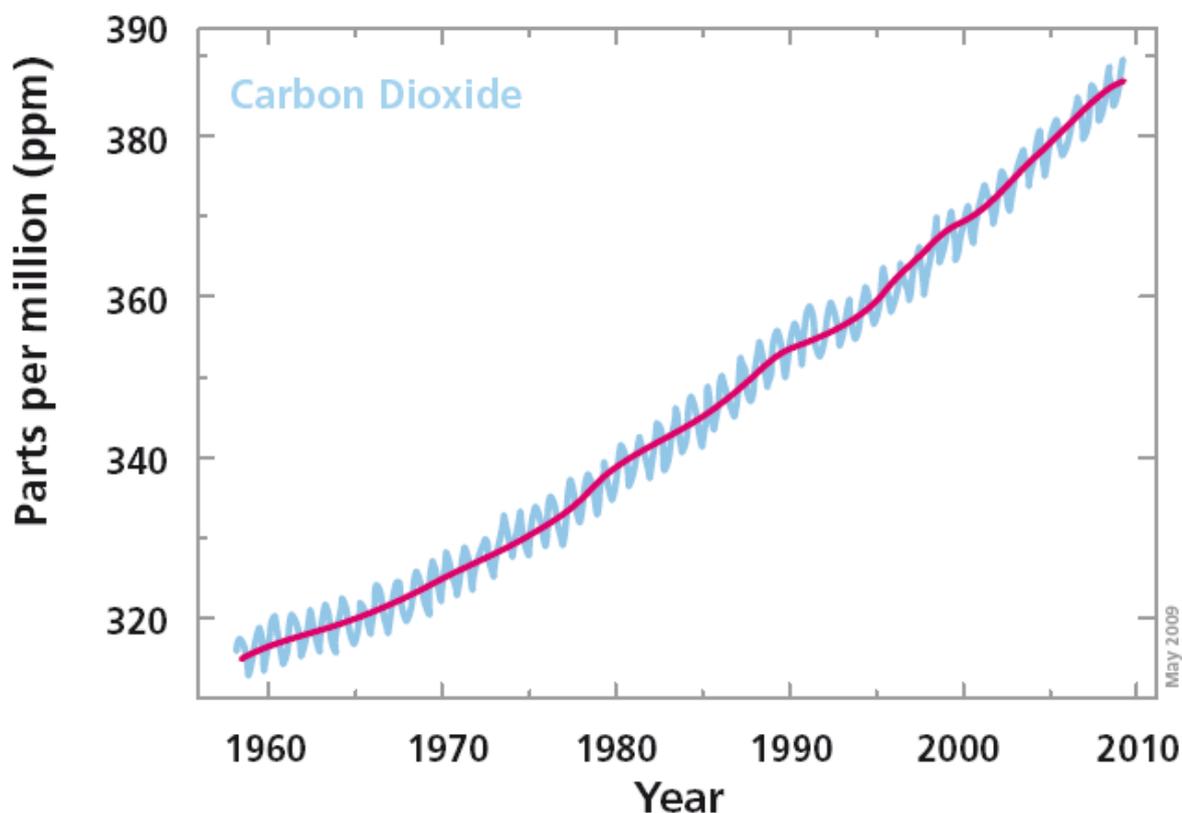


Fig. 6 – Andamento della concentrazione di anidride carbonica (CO_2) nell'atmosfera nell'ultimo cinquantennio; la netta ondulazione di periodo annuale è dovuta al ciclo stagionale dell'emisfero Nord, ricco di terre emerse e vegetazione, che assorbe la CO_2 . (Da: ENEA "Rapporto Energia e Ambiente 2008" Luglio 2009).

Senza interventi, essa potrà superare largamente le 500 ppm entro questo secolo: a questi livelli, i modelli climatologici prevedono riscaldamenti globali paragonabili a quello che ha posto termine all'ultimo massimo glaciale, ma che si sommerebbero a quest'ultimo, portando il globo terracqueo in una situazione non più verificatasi da molti milioni di anni.

Per afferrare pienamente le implicazioni di una tendenza come quella riportata in fig. 6, è necessario avere presenti le correlazioni dinamiche tra le principali variabili climatologiche, così come schematizzate in fig. 7 (IPCC, 2007c). Come si vede, si tratta di correlazioni essenzialmente di tipo integrale, cioè la variabile a valle è l'integrale di quella a monte, salvo la presenza di retroazioni stabilizzanti con costanti di tempo più o meno lunghe.

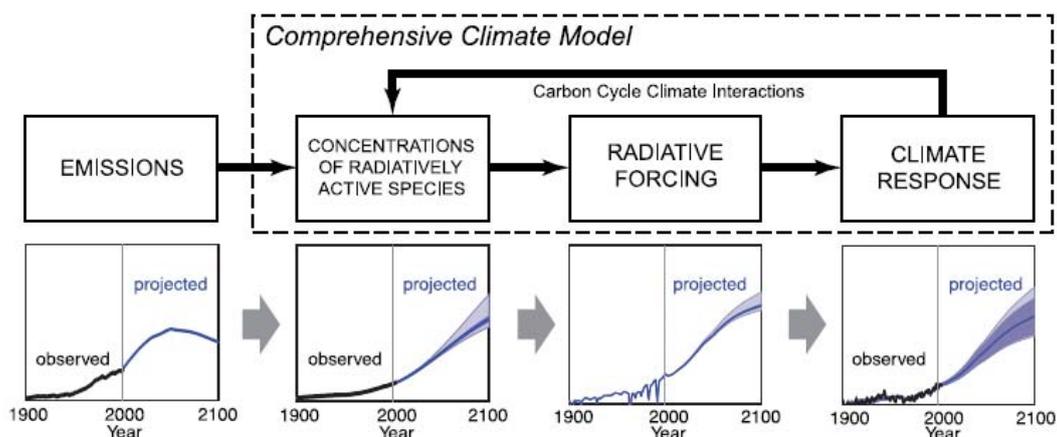


Figure 10.1. Several steps from emissions to climate response contribute to the overall uncertainty of a climate model projection. These uncertainties can be quantified through a combined effort of observation, process understanding, a hierarchy of climate models, and ensemble simulations. In a comprehensive climate model, physical and chemical representations of processes permit a consistent quantification of uncertainty. Note that the uncertainty associated with the future emission path is of an entirely different nature and not addressed in Chapter 10. Bottom row adapted from Figure 10.26, A1B scenario, for illustration only.

Fig. 7 – Schema con le correlazioni dinamiche tra le principali variabili climatologiche. (Da: IPCC "Climate Change 2007 - The Physical Science Basis - 10 Global Climate Projections - 10.1 Introduction" <http://www.ipcc.ch/>).

Per piccole perturbazioni, l'equazione che fornisce la frazione $f(t-t_0)$ al tempo t (in anni) di una perturbazione nella concentrazione di CO_2 inserita al tempo t_0 è la seguente (Joos et al., 1996; Lenton and Vaughan, 2009):

$$f(t-t_0) = 0,18 + 0,14 e^{-(t-t_0)/420} + 0,18 e^{-(t-t_0)/70} + 0,24 e^{-(t-t_0)/21} + 0,26 e^{-(t-t_0)/34}$$

In base a questa equazione, per una istantanea immissione (o sottrazione) di CO_2 nell'atmosfera, il 92% è ancora presente (o rimosso) dopo un anno, il 64% dopo 10 anni, il 34% dopo 100 anni, ed il 19% dopo 1000 anni.

Appare quindi evidente come l'effetto-serra, se veramente esiste, sia già "decollato" con un andamento che è correlato all'"integrale" dell'incremento di concentrazioni di gas-serra già avvenuto rispetto ai tempi preindustriali. Questo incremento è già molto notevole (per l'anidride carbonica, da circa 275 a circa 390 ppm: oltre il 40%), e persisterà comunque in larga misura per molti secoli.

Tale incremento provocherà un aumento della temperatura dell'atmosfera non solo finché venisse bloccato, ma finché non fosse del tutto eliminato con il ritorno alle concentrazioni preindustriali. Senza interventi attivi, tuttavia, il ritorno alle concentrazioni preindustriali mediante il ciclo del carbonio "naturale" non sarebbe possibile neanche dopo un millennio. Se comunque, mediante interventi attivi, si ritornasse alle concentrazioni preindustriali, a quel punto resterebbero poi da raffreddare l'atmosfera e soprattutto gli oceani (evento quest'ultimo molto più arduo e lento, dato il loro enorme contenuto entalpico).

In realtà le cose stanno andando molto peggio, in quanto non solo le concentrazioni, ma anche le emissioni (al cui "integrale" le concentrazioni sono a loro volta correlate) continuano a crescere rapidamente. Basta considerare i paesi in via di rapido sviluppo come Cina ed India (ciascuno dei quali "pesa" come popolazione circa venti volte l'Italia), dove, a parte il volonteroso impegno

nel nucleare, la quasi totalità delle nuove centrali elettriche è alimentata a carbone, e dove stanno per esplodere i trasporti privati su strada.

L'industrializzazione della Cina (e, a seguire, dell'India) viene da molti ritenuta il più importante evento della storia moderna dell'umanità, dopo il Rinascimento italiano e la Rivoluzione Industriale inglese. Nel 2008 la Cina ha posto in rete nuove centrali elettriche per una potenza di oltre 90.000 MWe, cioè 90 gigawatt elettrici (GWe) (pari a tutte le centrali costruite dall'Italia in un secolo!), raggiungendo una potenza installata di 800 GWe. Al 2020 la Cina intende arrivare ad una potenza installata di almeno 1500 GWe (cioè circa 1 GWe per milione di abitanti, che è poi un livello ancora inferiore a quello attuale dell'Italia). La quasi totalità delle centrali cinesi (e indiane) attualmente in funzione e in costruzione è a carbone, e la loro vita utile si può ritenere di almeno 40 anni: ciò significa che in pratica, qualunque sia l'impegno dei paesi sviluppati, lo scenario delle emissioni di gas-serra alla metà di questo secolo è già in buona parte compromesso dal previsto sviluppo economico (e sociale) dei nuovi paesi emergenti. Questi paesi, infatti, manifestano molte riserve riguardo a futuri accordi globali e vincolanti sui cambiamenti climatici.

La dinamica del sistema energetico globale

La potenza primaria utilizzata nel mondo è oggi pari a circa 13 TW (equivalenti, in potenza elettrica, a 13.000 grandi centrali), di cui l'85% proviene da combustibili fossili. Nell'ipotesi di ammettere un ragionevole miglioramento del livello di vita anche nei paesi oggi in via di sviluppo, una stabilizzazione del livello di CO₂ rispettivamente a 550, 450 e 350 ppm richiederebbe la disponibilità, a metà di questo secolo, di una potenza primaria esente da emissioni dell'ordine di 15, 25 e oltre 30 TW (Hoffert et al., 1998). Raggiungere questi obiettivi è tutt'altro che facile.

Secondo gli ambientalisti (e molti politici), la via più efficace per ridurre le emissioni di gas-serra, mantenendo lo sviluppo economico, risiederebbe in cambiamenti rivoluzionari nelle tecnologie per produrre, distribuire, accumulare, convertire l'energia. Ma il significato pratico di questa affermazione non è chiaro a gran parte dei decisori (sia a livello nazionale che sovranazionale).

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nel 2001 affermava che:

"...known technological options could achieve a broad range of atmospheric CO₂ stabilization levels, such as 550 ppm, 450 ppm or below over the next 100 years or more. . . . Known technological options refer to technologies that exist in operation or pilot plant stage today. It does not include any new technologies that will require drastic technological breakthroughs...". (Metz et al., 2001).

E ancora nel recente Synthesis Report del 4° Rapporto del Novembre 2007 lo IPCC afferma:

*"There is **high agreement** and **much evidence** that all stabilisation levels assessed can be achieved by deployment of a portfolio of technologies that are either currently available or expected to be commercialised in coming decades, assuming appropriate and effective incentives are in place for development, acquisition, deployment and diffusion of technologies and addressing related barriers."* (IPCC, 2007d).

In realtà, queste affermazioni non tengono adeguatamente conto degli ordini di grandezza degli investimenti e dei tempi richiesti dalle necessarie realizzazioni logistiche ed industriali, né delle conseguenti implicazioni socio-politiche. I cambiamenti "rivoluzionari" prima citati, in particolare, dovranno essere tali non tanto dal punto di vista tecnologico, quanto dal punto di vista della loro accettazione ed implementazione su grande scala industriale in tutto il mondo: per raggiungere quegli obiettivi, infatti, in meno di cinquant'anni occorrerebbe mettere in produzione impianti esenti da emissioni di gas-serra per una potenza anche molto superiore a tutta la potenza oggi utilizzata nel mondo.

In fig. 8, tratta da Hoffert et al. (1998), sono forniti gli andamenti delle emissioni di carbonio da combustibili fossili e della potenza primaria nel corso del XXI secolo per diversi scenari di stabilizzazione (scenario IPCC IS92a, denominato "business-as-usual", e scenari di stabilizzazione della CO₂ atmosferica a 750, 650, 550, 450 e 350 ppm).

I diagrammi di fig. 8 erano stati prodotti oltre 10 anni or sono, ed è allora istruttivo esaminare come nell'ultimo decennio si sono svolti i fatti rispetto alle previsioni:

- le emissioni di carbonio negli ultimi 10 anni sono cresciute molto più rapidamente di quanto previsto dallo scenario IPCC IS92a, denominato "business-as-usual", a causa dello sviluppo impetuoso dei paesi di nuova industrializzazione (Cina, India, ecc.); l'attuale recessione mondiale, che peraltro pare essere meno sentita in quei paesi, potrà comunque riportare l'andamento su quello allora previsto (v. diagramma a);
- gli andamenti-limite per le emissioni che avrebbero permesso di stabilizzare a regime la CO₂ atmosferica a 350 e 450 ppm in volume appaiono quindi ormai sensibilmente superati, ma si sta superando in questi anni anche quello relativo alle 550 ppm (v. diagramma a);
- nel 2008 la frazione di energia primaria esente da emissioni (*carbon-free*: biomasse, nucleare, idroelettrico, geotermico, eolico, solare) si aggira sul 20% del consumo totale (circa 2,5 TW), mentre dovrebbe già essere almeno il doppio per restare nel limite di 450 ppm (v. diagramma c).

Sia pure in grave ritardo, che cosa allora si può fare per ridurre le emissioni di gas-serra nei prossimi decenni? Un'ampia analisi delle alternative tecnologiche che si offrono per raggiungere l'obiettivo era stata fornita su *Science* da Hoffert et al. (2002), ma poche di esse possono stare alla base di un effettivo rivolgimento dell'infrastruttura energetica mondiale da realizzare in qualche decennio. Ad es., il risparmio energetico, per quanto significativo per i paesi già ricchi, diviene irrilevante a fronte della crescente domanda energetica dei grandi paesi in via di rapido sviluppo. La decarbonatazione (sequestro della CO₂ prodotta) è industrialmente e ambientalmente immatura, ed in ogni caso molto onerosa.

Tenuto conto anche del fatto che le fonti fossili sono destinate ad esaurirsi, occorrono allora soluzioni più sostenibili a lungo termine: queste si riducono alle rinnovabili (biomasse, solare termica e fotovoltaica, eolica, idraulica, geotermica, oceanica termica e mareale) ed alle nucleari (fissione e fusione). Ma vediamo, in base alla storia della industrializzazione, in che misura ed in che tempi le nuove fonti energetiche potrebbero subentrare alle precedenti.

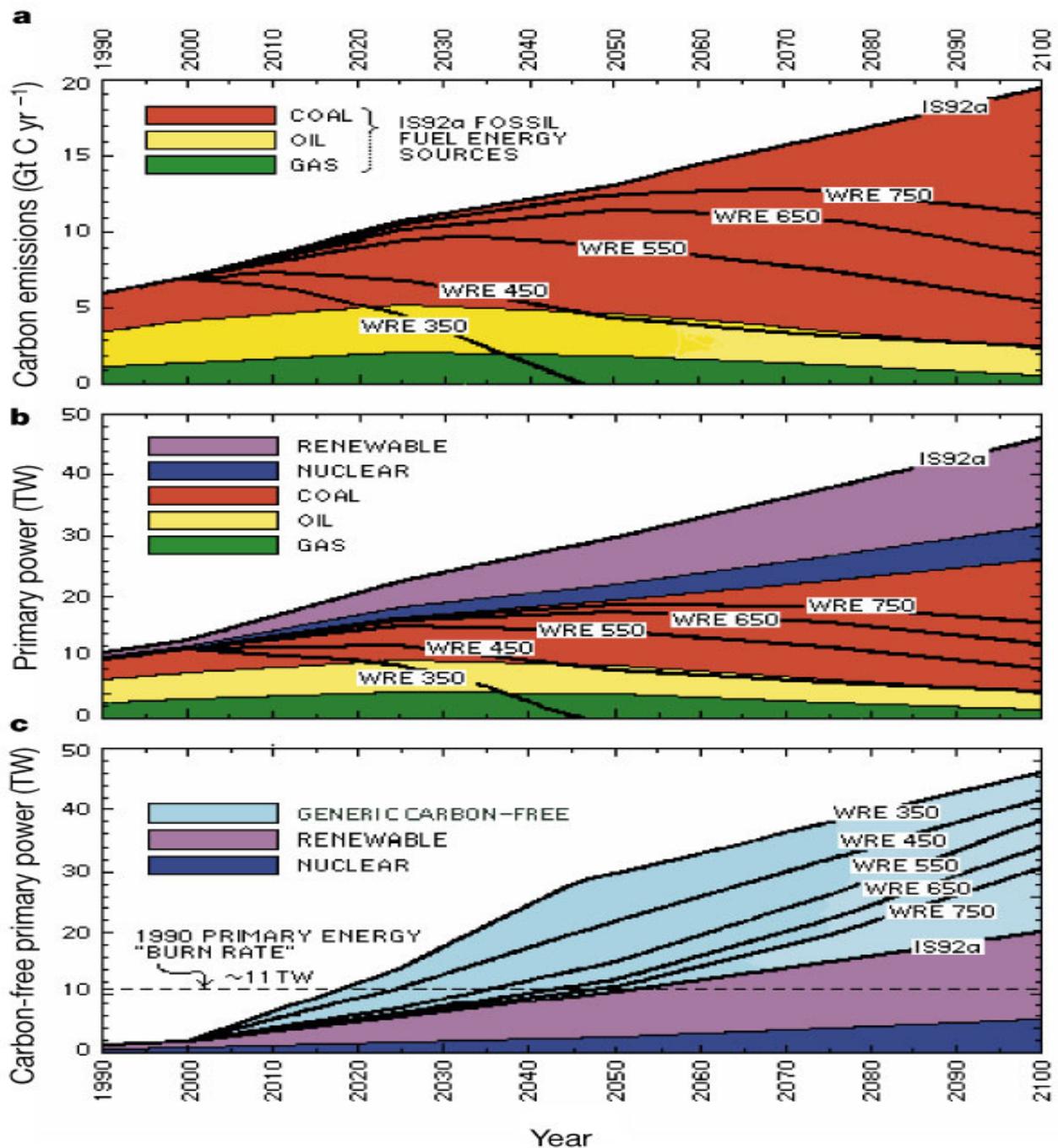


Fig. 8 – Andamenti delle emissioni di carbonio da combustibili fossili e della potenza primaria nel corso del XXI secolo per diversi scenari di stabilizzazione (scenario IPCC IS92a, denominato "business-as-usual", e scenari di stabilizzazione della CO₂ atmosferica a 750, 650, 550, 450 e 350 ppm in volume): **a**, emissioni di carbonio; **b**, potenza primaria; **c**, potenza primaria "senza emissione di carbonio" (carbon-free primary power). La potenza primaria "senza emissione di carbonio" è la potenza primaria totale meno la potenza da combustibili fossili, e può comprendere il nucleare, l'eolico, il solare, ed anche fonti fossili con sequestro della CO₂. Gli andamenti di **a**, calcolati da Wigley, Richels ed Edmonds (WRE) (Wigley et al., 1996) rappresentano i limiti per le emissioni che permettono di stabilizzare a regime la CO₂ atmosferica rispettivamente a 750, 650, 550, 450 e 350 ppm in volume. (Da: M. I. Hoffert et al. "Energy implications of future stabilization of atmospheric CO₂ content" *Nature*, Vol. 395, pp. 881-884 - 29 Oct. 1998).

In fig. 9, tratta come le seguenti da "The Outlook for Energy 2008" della ExxonMobil (2008), viene fornita, per l'ultimo secolo, l'evoluzione delle percentuali spettanti alle varie fonti energetiche rispetto ai consumi totali di energia (si tenga tuttavia ben presente che, come già detto, questi consumi sono aumentati nel periodo di ben 16 volte, e quindi anche le fonti con frazioni decrescenti possono essere aumentate, e di molto, in quantità assolute).

Dal diagramma di fig. 9 risulta comunque chiaro che le nuove fonti penetrano nel mercato secondo classiche curve logistiche, che risentono poco di guerre e crisi economiche, e che presentano una "costante di tempo" (tempo impiegato da una data fonte per passare dal 10% al 90% della penetrazione massima) dell'ordine degli ottanta anni. Questa lunga "inerzia", inerente alla evoluzione delle grandi infrastrutture energetiche, è evidentemente conseguenza dei lunghi tempi richiesti dall'iter decisionale e dalla costruzione degli impianti, e della sempre crescente "vita utile" prevista per gli impianti di nuova progettazione (anche 70 anni, per i nuovi impianti nucleari di III generazione!).

E' poi importante notare che ciascuna delle nuove tecnologie energetiche era già pienamente matura, dal punto di vista tecnologico ed industriale, ben prima (anche un secolo prima) del rispettivo massimo di penetrazione. La tecnologia energetica che potrà subentrare alla massima penetrazione relativa del gas naturale, nella seconda metà di questo secolo, dovrebbe quindi essere individuata tra quelle già oggi mature e sperimentate a livello industriale. Molte delle cosiddette "nuove fonti rinnovabili", così come la cattura ed il sequestro del carbonio, non rientrano certo in questa classe. L'unica nuova tecnologia comparsa in misura significativa nell'ultimo trentennio è la "nucleare da fissione", la quale secondo questo scenario si trova all'inizio della propria logistica di penetrazione, che potrà quindi proseguire per tutto il XXI secolo.

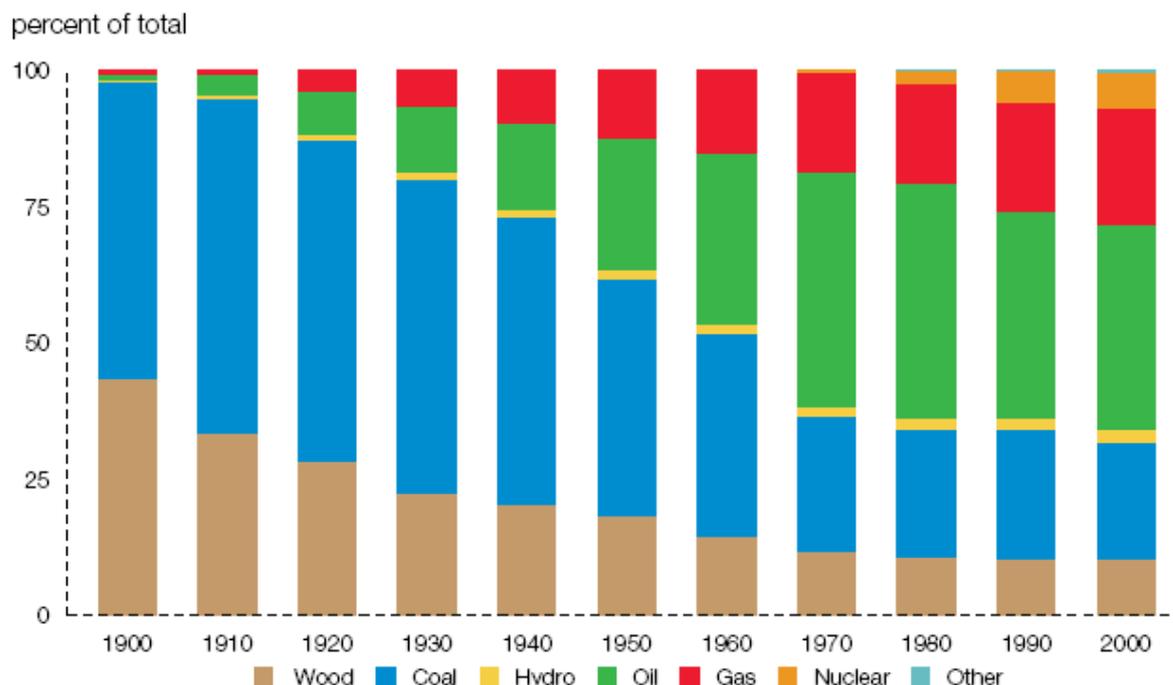


Fig. 9 – L'evoluzione delle fonti energetiche nell'ultimo secolo, in percentuali del totale. (Da: ExxonMobil "The Outlook for Energy - A View to 2030" December 2008).

Un'altra importante lezione ricavabile dalla storia della industrializzazione è la stretta correlazione tra la crescita della popolazione, il progresso economico e le quantità ed i tipi di fonti energetiche utilizzate nei diversi paesi del mondo. Anche se i tassi di nascite stanno diminuendo in tutto il mondo, si può ipotizzare una crescita della popolazione mondiale ad un tasso annuo di circa l'1% dal 2005 al 2030: ciò significa che gli abitanti del Pianeta passeranno dai 6,7 miliardi attuali ad 8 miliardi nel 2030.

Il "prodotto interno lordo" (Gross Domestic Product: GDP), nonostante l'attuale recessione, che peraltro sembra non toccare troppo i paesi di nuova industrializzazione, dovrebbe crescere del 3% l'anno fino al 2030. Infatti, come già detto, l'esperienza dell'ultimo secolo ci dimostra che anche grandi eventi catastrofici, come guerre, o gravi depressioni economiche, a livello globale praticamente non influiscono sugli andamenti di lungo periodo. Di conseguenza, si può realisticamente prevedere che la richiesta di energia crescerà dell'1,2% l'anno da ora al 2030, raggiungendo un livello di oltre due volte quello del 1980. Tutto ciò è chiaramente riportato in fig. 10, dove nel terzo diagramma "Energy demand" è anche indicato in tratteggio l'andamento che era stato previsto nell'Energy Outlook 2007, quest'anno ridotto per tener conto della recessione economica in corso.

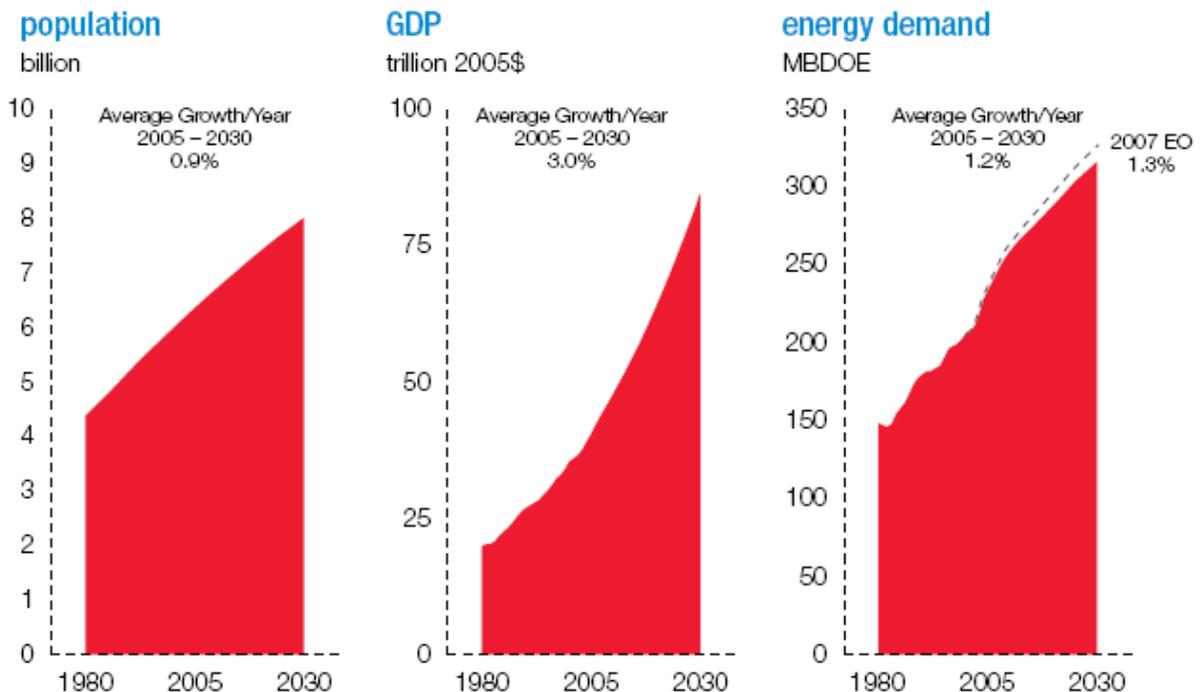


Fig. 10 – Andamenti di popolazione, reddito e domanda di energia dal 1980 al 2030 (MBDOE: Million Barrels per Day of Oil-equivalent Energy). (Da: ExxonMobil "The Outlook for Energy - A View to 2030" December 2008).

Da questa prospettiva si possono poi dedurre gli andamenti articolati per fonte di energia e, di conseguenza, la previsione per le emissioni di CO₂ fino al 2030.

Tutto ciò è riportato nella fig. 11, da cui risulta evidente che l'incremento delle emissioni, anche se inferiore a quello della domanda di energia, sarà ancora di circa il 30% tra il 2005 ed il 2030.

Queste previsioni tengono conto di un diffuso miglioramento dell'efficienza di veicoli, processi produttivi ed edilizia, nonché di un crescente utilizzo dell'energia nucleare e delle energie rinnovabili, e del gas naturale in luogo del carbone. In particolare, risulta evidente che anche al 2030 il contributo energetico *carbon-free* verrà fornito per la gran parte dalle biomasse (comprese quelle tradizionali dei paesi sottosviluppati), dall'idroelettrico, dal geotermico e dal nucleare, mentre il ruolo delle "nuove rinnovabili" (eolico e solare) resterà trascurabile.

Queste previsioni possono forse apparire pessimistiche rispetto agli scenari velleitari delineati in certe sedi politiche, ma appaiono senz'altro molto realistiche, quando si tenga conto della loro articolazione per regione, come riportato in fig.12. La saturazione, e poi la riduzione, dei consumi di energia e quindi delle emissioni appaiono infatti probabilmente attuabili nei prossimi vent'anni soltanto nei paesi ad economia matura e popolazione stagnante, ma non certo nei paesi di nuova industrializzazione e popolazione crescente (per i quali in figura viene riportato solo il caso della Cina, ma ad essa, come noto, faranno seguito molti altri grandi paesi). Ad ogni buon conto, queste previsioni sono pur sempre più ottimistiche di quelle del caso di riferimento considerato dalla International Energy Agency (e riportate nelle fig. 11 e 12).

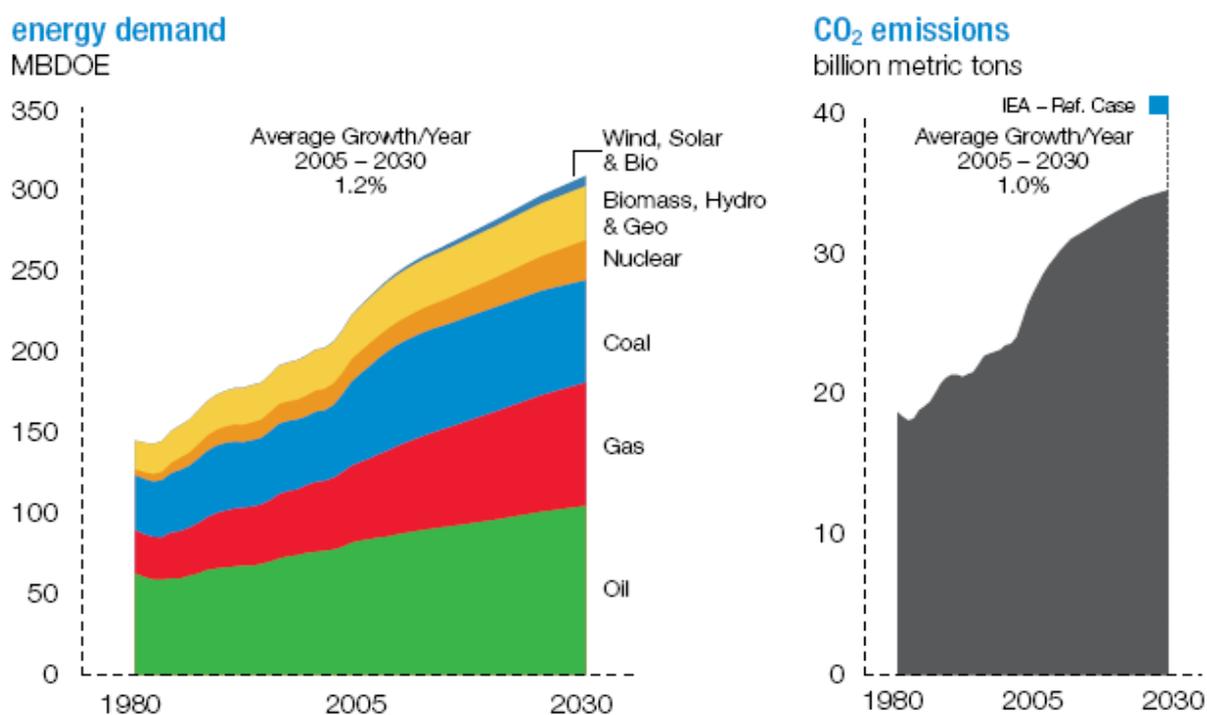


Fig. 11 - Andamenti dal 1980 al 2030 della domanda giornaliera di energia, articolata per tipo di fonte (MBDOE: Million Barrels per Day of Oil-equivalent Energy), e delle emissioni annuali di CO₂. IEA - Ref. Case: Reference Case considered by the International Energy Agency. (Da: ExxonMobil "The Outlook for Energy - A View to 2030" December 2008).

Dalla fig. 11, in particolare, risulta che al 2030 le emissioni annuali di CO₂ saranno dell'ordine di 35 miliardi di tonnellate (corrispondenti a circa 10 miliardi di tonnellate di carbonio). Dall'esame del diagramma a di fig. 8 risulta allora evidente che verrà superato anche l'andamento-limite che avrebbe permesso di stabilizzare a regime la CO₂ atmosferica alle 550 ppm.

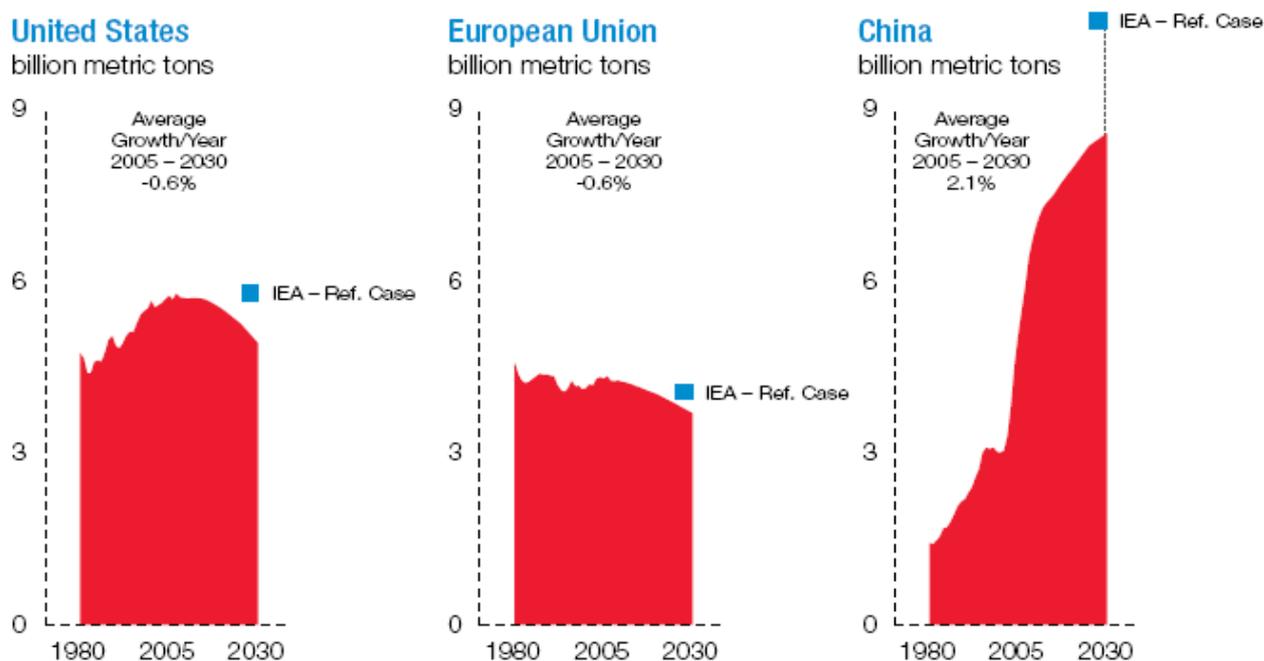


Fig. 12 – Andamento delle emissioni annuali di CO₂ dal 1980 al 2030, articolato per regione. IEA - Ref. Case: Reference Case considered by the International Energy Agency. (Da: ExxonMobil "The Outlook for Energy - A View to 2030" December 2008).

A simili conclusioni si può arrivare anche con il seguente ragionamento, cosiddetto della "torta del carbonio" (*carbon pie*) (Broecker, 2007). Al 2007 venivano emesse in atmosfera dall'Uomo circa 8 miliardi di tonnellate (Gt) di carbonio all'anno (compresa la deforestazione): ciò, come già detto, ha provocato un aumento della concentrazione di CO₂ di circa 2 ppm/anno. Vige cioè il rapporto: 4 Gt di C per 1 ppm di CO₂. Se quindi poniamo un tetto massimo ammissibile alla concentrazione di CO₂ (nel 2007 a 380 ppm), otteniamo la dimensione della "torta del carbonio" che l'umanità potrebbe ancora utilizzare:

- se il limite è posto a 450 ppm, la torta è: $(450-380) \times 4 = 280$ Gt di C
- se il limite è posto a 550 ppm, la torta è: $(550-380) \times 4 = 680$ Gt di C

In un mondo ideale, ogni paese avrebbe diritto ad una fetta di questa torta proporzionale alla sua popolazione (lasciando però da parte la storia pregressa). In tal caso, gli attuali paesi "ricchi" avrebbero diritto solo al 20% della torta, cioè circa 54 Gt di C per tetto di CO₂ a 450 ppm e 136 Gt di C per tetto di CO₂ a 550 ppm: al loro ritmo di consumo attuale (6 Gt/anno), essi esaurirebbero la loro quota in 9 anni nel primo caso ed in 22 anni nel secondo caso!

Supponendo invece che gli attuali paesi "ricchi" avviassero da oggi una riduzione lineare delle emissioni, anche per un limite di CO₂ a 550 ppm esse dovrebbero comunque essere annullate in meno di 50 anni (verso il 2050): si tratta di obiettivi che neanche i paesi esemplari, come la Gran Bretagna, o gli stessi ambientalisti, osano porsi.

L'intervento diretto sul Sistema Clima

La crescente consapevolezza della situazione critica in cui si è posta l'umanità riguardo ai cambiamenti climatici ha indotto la rivista *Nature* a raccogliere nel suo numero del 30 aprile 2009 una serie di articoli in un servizio dal titolo "*The climate crunch*" (Monastersky, 2009; Jones, 2009; Morton, 2009). Nello stesso numero, altri articoli approfondiscono l'argomento, in particolare per quanto riguarda le complesse correlazioni tra gli andamenti nel tempo delle emissioni e delle concentrazioni di gas-serra, e tra questi e l'andamento nel tempo della temperatura media superficiale del Pianeta.

Da uno di questi articoli (Parry et al., 2009) si può trarre la fig. 13, che fornisce gli scenari fino all'anno 2400 della temperatura superficiale globale media, per diverse date di raggiungimento del picco delle emissioni, e nell'ipotesi (senz'altro ottimistica) che dopo il picco le emissioni vengano ridotte regolarmente del 3% all'anno. Tornando al diagramma di destra della fig. 11, appare chiaro che il picco quasi certamente non verrà raggiunto prima del 2035, e che quindi lo scenario più probabile appare l'ultimo a destra di fig. 13.

Come si vede, vi è una probabilità molto alta che la temperatura superficiale globale media superi di ben oltre i 2°C il livello preindustriale entro la fine di questo secolo, e continui a crescere anche in seguito. E' inoltre chiaro che un ritorno del Sistema Clima alle condizioni preindustriali (o comunque alle condizioni "naturali" che si sarebbero verificate senza l'intervento antropico) non potrà avvenire prima di molti secoli.

Se si ritiene indispensabile limitare l'aumento della temperatura non oltre i 2°C al 2100 al fine di evitare rischi inaccettabili per l'ecosistema terrestre (obiettivo che ora sembra condiviso da tutti i principali paesi del mondo, tra cui i grandi paesi in via di rapido sviluppo), allora anche i semplici ragionamenti del paragrafo precedente confermano l'inevitabilità di interventi "attivi" sul clima.

In una simile prospettiva, a partire dai paesi più evoluti dovrebbe essere assegnata un'alta priorità allo studio ed alla sperimentazione di tutti i mezzi in grado di fronteggiare le conseguenze dell'effetto-serra. Queste problematiche si possono ritenere oggetto di una nuova disciplina denominata *Geoengineering* (un capitolo della quale è la *Climate Engineering*). In sostanza, si tratta di considerare il "globo terracqueo", costituente il Pianeta Terra, come un "ambiente" da "climatizzare" con le più evolute ed efficienti tecnologie dell'ingegneria termofluidodinamica.

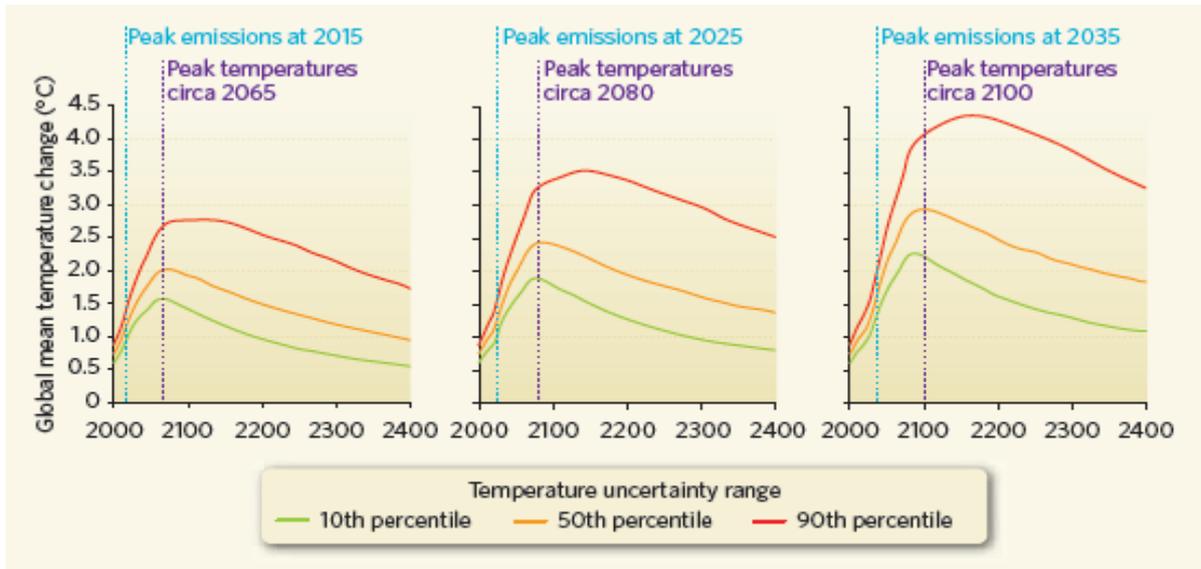


Figure 1 | Temperature scenarios. Global average surface temperature scenarios for peak emissions at three different dates (2015, 2025 and 2035) with 3%-per-year reductions in greenhouse-gas emissions.

Fig. 13 - Scenari fino all'anno 2400 della temperatura superficiale globale media, per diverse date di raggiungimento del picco delle emissioni, e nell'ipotesi che dopo il picco le emissioni vengano ridotte regolarmente del 3% all'anno. (Da: M. Parry et al. "Overshoot, adapt and recover" *Nature*, Vol. 458, pp. 1102-1103 - 30 April 2009).

Si tratta di idee certo non nuove, come appare dalla fig. 14, tratta da un articolo di *Nature* del 2001 (Keith, 2001), e che sintetizza la varietà di opzioni che si potrebbero considerare. Fino a qualche tempo fa, tuttavia, questo argomento è stato rimosso dagli ambientalisti ed anche da molti politici, in quanto evidentemente è inconciliabile con una visione "sacrale" della Natura, che porterebbe ad escludere qualsiasi intervento regolatorio da parte dell'Uomo (Schneider, 2001). Purtroppo, però, come abbiamo visto, oggi è di gran lunga troppo tardi per mantenere questi atteggiamenti, e l'inazione dell'Uomo non potrebbe che compromettere ulteriormente e gravemente le condizioni del Pianeta. Non stupisce quindi che recentemente si venga manifestando un crescente ed aperto interesse su questo argomento, come dimostrato dal già citato servizio dal titolo "The climate crunch" pubblicato dalla rivista *Nature* nel suo numero del 30 aprile 2009 (Monastersky, 2009; Jones, 2009; Morton, 2009).

Ognuna delle opzioni schematizzate in fig. 14 ha dei pro e dei contro:

- # i deflettori della radiazione solare, da disporre in particolari siti del Sistema Solare, appaiono per ora al di là delle capacità tecnico-economiche della ingegneria spaziale;
- # la decarbonatazione (cattura e sequestro della CO₂ prodotta) è industrialmente e ambientalmente immatura, ed in ogni caso molto onerosa; comunque, richiederebbe decenni per divenire rilevante;
- # la fertilizzazione con ferro delle alghe negli oceani si è già dimostrata inefficiente ed ambientalmente rischiosa;

la riforestazione sequestra carbonio solo per alcuni anni, e, più in generale, la coltivazione di biomasse per produrre elettricità o biocarburanti ha un bilancio del carbonio incerto ed entra in grave competizione con la produzione di alimenti;

restano le opzioni che intendono regolare l'“albedo” del Pianeta Terra, a cui è dedicato interamente l'articolo di Oliver Morton “Great white hope”, riportato nel citato servizio di *Nature* (Morton, 2009).

Recentemente due ricercatori, Timothy Lenton e Naomi Vaughan, rispettivamente della Università della East Anglia, Norwich, UK, e del Tyndall Center for Climate Change Research, UK, hanno condotto una analisi, per quanto oggi possibile completa e rigorosa, della efficacia relativa ed assoluta per tutte le opzioni di *geoengineering* finora prese in considerazione (Lenton and Vaughan, 2009). Il confronto viene fatto con un criterio omogeneo, e cioè la capacità offerta da ogni opzione per riequilibrare lo sbilancio radiativo a cui attualmente è soggetto il Pianeta Terra. Tale sbilancio può essere compensato:

1. riducendo la quantità di radiazione solare (ad onde corte) assorbita dal Pianeta;
2. aumentando la quantità di radiazione (ad onde lunghe) emessa dal Pianeta.

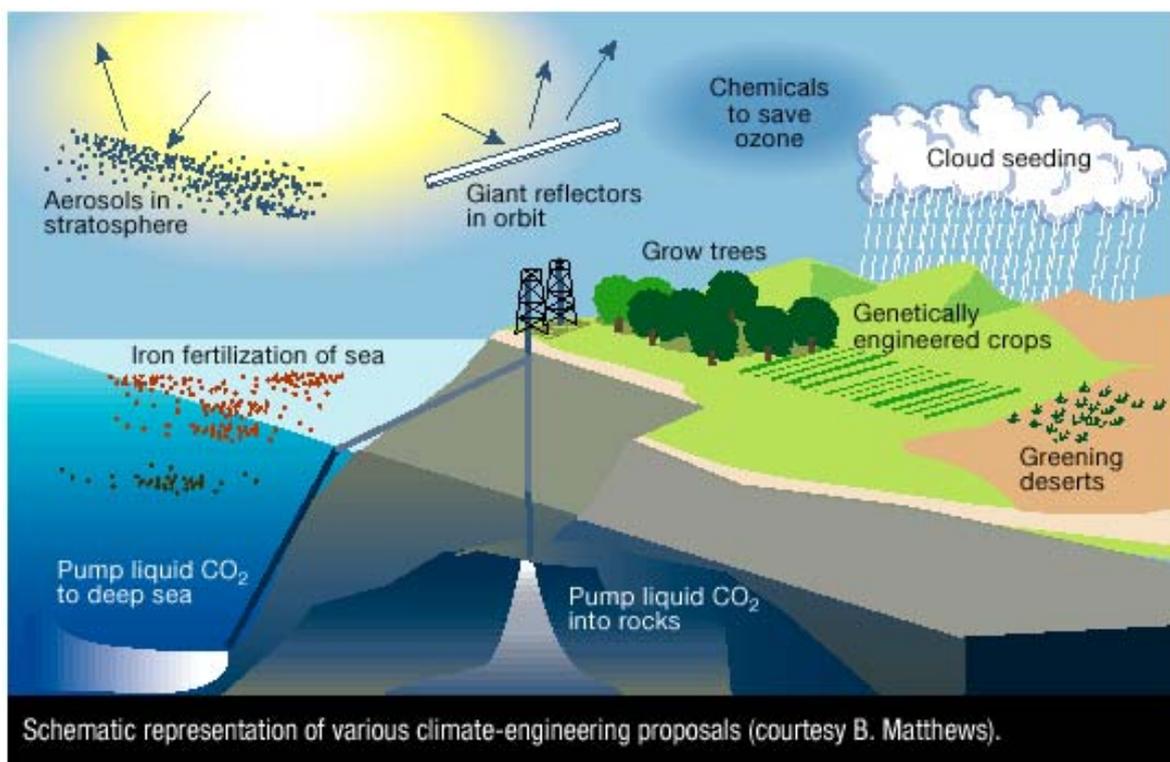


Fig. 14 - La varietà di opzioni che si potrebbero considerare per l'intervento diretto sul Sistema Clima. (Da: D.W. Keith "Geoengineering" *Nature*, Vol. 409, p. 420 - 18 January 2001).

Con riferimento alla fig. 14, le opzioni che riducono la concentrazione della CO₂ si possono definire quelle delle “onde lunghe”, in quanto favoriscono la

fuoruscita dall'atmosfera della radiazione infrarossa; le opzioni che agiscono sull'"albedo" del Pianeta, invece, si possono definire come quelle delle "onde corte", in quanto tendono a riflettere nello spazio la radiazione solare incidente.

Le opzioni ad "onde corte", a loro volta, si possono suddividere in due classi:

- 1.a) quelle che cercano di ridurre la radiazione solare che arriva al culmine dell'atmosfera;
- 1.b) quelle che cercano di aumentare la riflessione della radiazione ad "onde corte" nell'atmosfera o alla superficie.

Le opzioni ad "onde lunghe", a loro volta, si possono suddividere in due classi, a seconda che la CO₂ sottratta all'atmosfera venga "sequestrata": 2.a) sottoterra, oppure: 2.b) negli oceani.

Lenton e Vaughan, nel lavoro già citato, hanno valutato i massimi potenziali di forzante radiativa per le più varie opzioni di *geoengineering*, e li hanno comparati con la forzante radiativa dovuta alle emissioni antropogeniche di CO₂: quest'ultima, nel caso di assenza di azioni di "mitigazione", si prevede che arrivi già in questo secolo a circa 7 Wm⁻² e resti a tale livello per l'intero millennio, mentre, nel caso di una efficace azione di "mitigazione", potrà limitarsi a 3 Wm⁻² nel corso di questo secolo per rimanere oltre 1 Wm⁻² per il resto del millennio.

Da detta analisi risulta che poche opzioni di *geoengineering*, da sole, hanno la capacità di compensare più di 3 Wm⁻²: praticamente solo i deflettori solari e gli aerosol stratosferici. Esse fornirebbero anche un'azione abbastanza uniforme sull'intero Pianeta, ma dovrebbero essere gestite con continuità per la durata necessaria, che potrebbe essere anche di molti decenni.

Le opzioni ad "onde lunghe", invece, cioè la cattura del carbonio dall'atmosfera con mezzi più o meno naturali, al 2050 non arriverebbero a compensare più di 2 Wm⁻² (mentre, anche nell'ipotesi migliore che la CO₂ non superi le 450 ppm, la forzante radiativa da compensare al 2050 sarebbe di circa 2,6 Wm⁻²). Queste opzioni, tuttavia, a lunghissimo termine avrebbero la capacità di riportare la CO₂ ai livelli preindustriali).

Appare allora evidente che solo l'attuazione di potenti, rapidi e ripetuti interventi di *geoengineering* del tipo ad "onde corte" sarebbero in grado di riportare il bilancio termico del Pianeta alle condizioni preindustriali. Vediamo allora più a fondo le caratteristiche di questi ultimi schemi.

La regolazione dell'"albedo"

Una analisi ampia e rigorosa delle alternative tecnologiche e dei possibili effetti collaterali di questo approccio era già stata fornita da Edward Teller et al. ad un convegno sulla *Climate Engineering* tenutosi a Cambridge, UK, nel gennaio 2004 (Teller, 2004). Teller parte dalla constatazione che da qualche milione di anni sul Pianeta Terra ci troviamo in una fase di *ice-house* che così fredda non si era più verificata da oltre 500 milioni di anni (dall'ultima glaciazione totale, prima della "esplosione biologica" del Cambriano). Egli quindi si chiede quanto sia opportuno puntare sempre soltanto su un raffreddamento dell'atmosfera, ed in effetti imposta le sue considerazioni tenendo anche presente l'evenienza di dover mantenere la Terra almeno tiepida, cioè agevolmente abitabile, a fronte

dell'avvio di una prossima, probabile, era glaciale, quando il picco "antropico" nella concentrazione dei gas-serra si fosse esaurito fra qualche centinaio di anni.

Le alternative tecnologiche considerate da Teller sono numerose: dall'iniezione nella stratosfera di particelle dielettriche o metalliche, fino a deflettori della radiazione solare da disporre nel sito "Lagrange-1" del Sistema Solare (dove le attrazioni di Sole e Terra si compensano). Se ad es. si utilizzasse un pulviscolo che riflette in modo selettivo l'ultravioletto, oltre a compensare agevolmente l'effetto-serra prevedibile per i prossimi decenni, si potrebbero conseguire effetti collaterali anche positivi, quali una sensibile riduzione dei danni sanitari da radiazione ultravioletta ed un netto aumento della produttività agricola, dovuto all'effetto congiunto di una ridotta radiazione ultravioletta e di una alta concentrazione di CO₂. Salvo che per gli schermi spaziali, per ora di difficile valutazione, Teller valuta la fattibilità ed i costi delle varie opzioni considerate, che in genere risultano di gran lunga più facili e meno costose da attuare rispetto ai programmi di riduzione delle emissioni di gas-serra, e conclude raccomandando il "*technical management of radiative forcing - vs. bureaucratic management of atmospheric inputs*".

Per quanto riguarda la stratosfera, la strategia che viene ormai seriamente considerata anche da esperti climatologi (come P. J. Crutzen, Premio Nobel per i suoi studi sul "buco" dell'ozono, o T. M. L. Wigley del National Center for Atmospheric Research, USA) è l'iniezione di aerosol, o di precursori di aerosol (come l'anidride solforosa), nella stratosfera, per riflettere una parte della radiazione solare incidente (Crutzen, 2006; Wigley, 2006).

Le eruzioni vulcaniche forniscono "esperimenti naturali" da cui si possono ottenere i parametri di base dei processi chimico-fisici, e valutare gli effetti anche a lungo termine sull'ambiente. L'eruzione del Mount Pinatubo, verificatasi nel 1991, iniettò circa 10 milioni di tonnellate di zolfo (TgS) nella stratosfera. La "foschia" di goccioline d'acqua legate ad acido solforico così generatasi, per gli uno-due anni che rimase in circolo, fu in grado di ridurre la temperatura media della superficie terrestre di circa 0,5°C (cioè circa l'incremento dell'ultimo secolo che viene addebitato all'effetto-serra antropogenico).

Simulazioni su modelli matematici indicano che, sparando nella stratosfera l'equivalente di un'eruzione del Pinatubo (10 milioni di tonnellate di zolfo) ogni due anni, si sarebbe in grado di contenere indefinitamente il riscaldamento previsto a causa dell'effetto-serra antropogenico. Si tenga presente che l'umanità già emette attualmente nella bassa atmosfera ben 55 TgS/anno. Ma l'iniezione artificiale potrebbe essere più efficace di quella del Pinatubo (ad es., particelle più fini ad alta quota, con maggior tempo di residenza): se ad es. bastassero 2 TgS/anno, il costo potrebbe essere di 50 miliardi/anno di US\$ (rispetto ai 1000 miliardi/anno che si spendono nel mondo per armamenti).

Un'alternativa interessante potrebbe essere l'iniezione di polverino di carbonio (fuliggine), che già avviene per attività industriali e incendi di foreste: l'albedo del Pianeta si ridurrebbe (maggior calor assorbito), ma la superficie terrestre si raffredderebbe. Basterebbe una massa dell'1,7% di quella dello zolfo per ottenere lo stesso effetto!

In proposito è da notare che l'attività umana emette attualmente grandi quantità di inquinanti, quali anidride solforosa e polverino di carbonio, che sembrano avere un effetto rilevante nella limitazione del riscaldamento dovuto

all'effetto-serra. Tuttavia, la ovvia propensione, anche nei paesi in via di sviluppo, a ridurre tali emissioni, dannose per la salute, rischia di aggravare ulteriormente la tendenza al riscaldamento della superficie terrestre.

Un approccio basato sulle nuvole, invece, potrebbe evitare alcune delle preoccupazioni connesse all'opzione precedente. Si potrebbe usare nient'altro che acqua di mare, opportunamente polverizzata al livello del mare, tra l'altro con dispositivi facilmente sperimentabili a scala locale e modulabili a piacimento. Per trasformare il vapor d'acqua in nuvole, occorrono opportune particelle chiamate "nuclei di condensazione". Se l'aria è ben fornita di questi nuclei, si formeranno molte piccole goccioline d'acqua; se l'aria ha meno nuclei, si formerà un minor numero di gocce più grandi. Le nuvole fatte di piccole goccioline sono più riflettenti rispetto a quelle fatte di grandi gocce, ed in certe condizioni durano anche di più.

L'acqua di mare polverizzata in goccioline di pochi micrometri di diametro (migliaia di volte più piccole delle gocce di pioggia) può generare un enorme numero di nuclei di condensazione, costituiti da piccolissimi cristalli di sale. Stephen Salter, già professore di ingegneria all'Università di Edimburgo, ha già sperimentato in laboratorio questo processo.

Circa il 25% di tutti gli oceani del mondo sono coperti da sottili strato-cumuli di bassa quota, che resi più riflettenti e durevoli potrebbero efficacemente raffreddare il Pianeta. Stephen Salter ha concepito un natante alimentato dal vento, che con turbine sottomarine aziona gli eiettori che generano la nebbia di acqua di mare, ed ha valutato che un migliaio di tali natanti, funzionanti senza operatori umani, potrebbero compensare il riscaldamento dovuto a decenni di emissioni di CO₂. Il costo di ciascuno di questi natanti potrebbe aggirarsi su qualche milione di dollari, e quindi l'investimento globale si aggirerebbe su qualche miliardo di dollari "una tantum", più manutenzione e rinnovo a fine vita utile; in ogni caso un impegno nettamente inferiore ai programmi proposti per la riduzione delle emissioni, ed anche ad altre opzioni per il controllo attivo del clima.

Naturalmente restano molti problemi aperti, anche prima di avviare una sperimentazione in mare sia pure a scala locale. Intanto occorre approfondire i processi che generano e distruggono le nuvole, e questo è un tema di grande criticità anche per il perfezionamento di tutti i modelli meteorologici e climatologici. Poi occorre valutare l'impatto sui fenomeni meteorologici nei territori attigui alle aree marine inseminate, il quale potrebbe essere notevole e non sempre accettabile. Infine, ci sarà da mettere a punto la tecnologia per la generazione a grande scala della nebbia di acqua marina.

Programmi di ricerca utili a questi fini sono già in corso, anche se dovrebbero essere molto potenziati. Da fine 2008, ricercatori di trenta istituzioni usano satelliti, aerei, navi e basi terrestri per studiare la dinamica delle nubi lungo le coste del Perù e del Cile, nell'ambito del progetto VOCALS, a sua volta parte del progetto VAMOS (che sta per: Variability of the American Monsoon System, mentre VOCALS sta per: VAMOS Ocean-Cloud-Atmosphere-Land Study). Sarebbe però importante pianificare a breve un significativo esperimento sul campo, cioè su un'area marina anche di centinaia di chilometri quadrati.

La radiazione solare può poi essere riflessa addirittura da superfici chiare al suolo, come edifici e strade, o praterie e coltivazioni di colore chiaro. Queste

opzioni sono state fatte oggetto di studi approfonditi (Akbari, 2009), anche se non sembrano tali da compensare neanche un raddoppio della CO₂.

I problemi di "governance" per gli interventi attivi sul clima

Come si è visto, recentemente è andato crescendo l'interesse per eventuali interventi attivi sul clima (*geoengineering*), ma in genere i discorsi si limitano agli aspetti tecnici e climatologici. Nell'ipotesi, tutt'altro che irrealistica, che i programmi di "mitigazione" (riduzione delle emissioni di gas-serra) e di "adattamento" ai cambiamenti climatici non risultino sufficientemente efficaci e/o tempestivi, sarebbe invece importante ed urgente prevedere fin da ora gli strumenti politici ed organizzativi necessari per avviare al più presto la ricerca e la sperimentazione sulla *geoengineering*, e, ove necessario, anche per attivare le conseguenti iniziative a grande scala.

Un'ampia analisi di questa problematica viene fornita da John Virgoe in un articolo pubblicato di recente su *Climatic Change* (Virgoe, 2009). Sotto molti aspetti la *geoengineering* comporta implicazioni socio-politiche sostanzialmente diverse rispetto ai ben noti programmi intesi alla "mitigazione" (Protocollo di Kyoto, ecc.). E' probabile che a livello socio-politico vi sarà una opposizione istintiva ad es. all'idea di "inquinare" deliberatamente l'atmosfera, ed in generale scetticismo sulla consapevolezza degli scienziati riguardo a quello che intendono fare. Tuttavia, l'opinione pubblica, e quindi anche i politici, potrebbero cambiare rapidamente idea di fronte a soluzioni tecniche di costo relativamente ridotto, di rapida attuazione ed in grado di evitare i radicali cambiamenti nello stile di vita, tra cui la rinuncia allo sviluppo socio-economico dei paesi di nuova industrializzazione, quali sarebbero certamente richiesti da efficaci programmi di "mitigazione".

Una caratteristica tipica della *geoengineering*, infatti, è quella di essere rivolta soltanto al cambiamento climatico, senza impatti apprezzabili su altri obiettivi ambientali o sociali: non richiede modifiche all'attuale stile di vita dei paesi sviluppati, o ai piani economici di quelli in via di sviluppo, non impone vincoli all'utilizzo delle foreste né minaccia l'uso e la diffusione dell'automobile. Tutto ciò potrà renderla invisibile agli "ambientalisti ideologici", ma accettabile da parte di molti "interessi costituiti". D'altra parte il filone dell'"ambientalismo ideologico", salvo eccezioni, appare ancora contrario all'energia nucleare ed ai grandi impianti idroelettrici, che sono tra le poche opzioni veramente efficaci per la "mitigazione".

Per quanto riguarda la *governance*, la *geoengineering* pone dei problemi sostanzialmente diversi rispetto a quelli tipici degli accordi internazionali relativi all'ambiente. Ad es. la riduzione delle emissioni dei gas-serra richiede azioni specifiche da parte di molti decisori, a molti livelli, in molti paesi diversi: si tratta di un'azione globale con un impatto globale. Al contrario, la *geoengineering* può configurarsi come un'azione locale con un impatto globale. Un intervento di *geoengineering* può richiedere l'azione di un solo attore politico, o di una sola apposita agenzia. In ogni caso un solo attore è preferibile ad una pluralità, in quanto si tratta di portare a termine in tempi brevi grandi realizzazioni ingegneristiche, e di adattarele anche in corso d'opera ai risultati via via ottenuti. Ovviamente, l'attuatore unico non esclude, anzi richiederebbe, un

adeguato regime multilaterale per la definizione delle iniziative, la distribuzione degli oneri economici ed il controllo dei risultati.

Una inevitabile preoccupazione per l'avvio di progetti di *geoengineering* è poi costituita dai possibili effetti collaterali dannosi. La distribuzione geografica degli effetti è altrettanto importante della loro entità. Ci saranno comunque "vincitori" e "perdenti", sia pure in senso relativo: ad es., gli agricoltori delle alte latitudini potrebbero attendere con piacere un sensibile riscaldamento del clima... Ovviamente queste difformità tra paesi, o tra gruppi di interesse, potranno originare richieste di compensazione, che dovranno essere gestite a livello politico e/o legale. Le vertenze sarebbero particolarmente delicate se i progetti fossero stati avviati da uno o da pochi paesi, e quindi sarebbe altamente auspicabile che a monte vi fosse comunque un accordo globale a livello delle Nazioni Unite.

Nessun trattato in essere, tuttavia, tratta esplicitamente di *geoengineering*. Anche la United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), lo strumento legale fondamentale sul cambiamento climatico, non prevede la possibilità di interventi *intenzionali* per modificare il clima, salvo che per lo "enhancement of sinks and reservoirs". E' da notare, in proposito che l'obiettivo primario della Convenzione è la "*stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system*" (italics added). Quindi, le opzioni di *geoengineering* che non agissero sulle concentrazioni di gas-serra resterebbero comunque al di fuori di quest'ambito.

Una significativa affermazione era comunque già stata fatta da Teller nel lavoro citato (Teller, 2004), e cioè che l'uso della *geoengineering* si potrebbe ritenere implicitamente ammesso dallo spirito della UNFCCC, in quanto strumento per conseguire con la massima efficienza gli obiettivi primari della Convenzione stessa: se gli interventi di *geoengineering* si rivelassero meno costosi e meno dannosi rispetto al non far niente o, come sembra sempre più probabile, rispetto a pesanti provvedimenti di "mitigazione", lo UNFCCC sarebbe anzi tenuto a promuovere quegli interventi.

Anche lo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dovrebbe evidentemente essere attivamente coinvolto nel coordinamento della ricerca e della sperimentazione delle possibili opzioni di *geoengineering*. In ogni caso, appare più che opportuno che la *governance* di un futuro programma di *geoengineering* venga organicamente e tempestivamente integrata negli organismi delle Nazioni Unite operanti nel campo del clima.

Un accordo sulla *geoengineering*, sia esso stipulato in ambito UNFCCC o di un apposito nuovo organismo delle Nazioni Unite, dovrebbe poi definire la struttura operativa incaricata di attivare gli interventi su larga scala. Come già si è detto, a differenza dei provvedimenti di "mitigazione", demandati ai singoli paesi, qui si tratta di portare a termine in tempi brevi grandi realizzazioni ingegneristiche, e di adattarle anche in corso d'opera ai risultati via via ottenuti. I modelli da considerare potrebbero allora essere quelli dell'IAEA (International Agency for Atomic Energy), sempre delle Nazioni Unite, oppure del CERN (European Organization for Nuclear Research), oppure del Progetto ITER per la fusione nucleare; oppure potrebbero essere attivate una o più grandi agenzie spaziali già esistenti, nel caso si arrivasse a pianificare la realizzazione di deflettori della radiazione solare da disporre nello spazio.

A conclusione delle precedenti considerazioni sulla *geoengineering*, si vuole qui fare uno specifico riferimento ad un ampio studio sull'argomento, promosso dalla inglese Royal Society, il cui rapporto conclusivo, recentemente pubblicato (Royal Society, 2009), fornisce dettagliate informazioni non solo tecniche ma anche economiche sulle numerose diverse possibili opzioni di intervento sul clima. Qualunque potrà essere l'esito dei futuri programmi di "mitigazione", il rapporto, con riguardo alla Gran Bretagna, afferma l'opportunità di avviare al più presto un programma di ricerca e sviluppo sulla *geoengineering*, in una prospettiva di 10 anni e con un finanziamento dell'ordine di 10 milioni di sterline all'anno.

Riferimenti

- Akbari, H. et al., 2009 "Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂" *Climatic Change*, Vol. 94, pp. 275-286.
- Allen, P. A., 2006 "Snowball Earth on Trial" *Eos, Transactions, American Geophysical Union, Electronic Supplement (Online Newspaper)*, Vol. 87, No. 45, p. 495 - 7 November 2006.
- Barker, S. et al., 2009 "Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation" *Nature*, Vol. 457, pp. 1097-1102 - 26 February 2009.
- Broecker, W. S., 2007 "CO₂ Arithmetic" *Science*, Vol. 315, p. 1371 - 9 March 2007.
- Carlslaw, K., 2009 "Cosmic rays, clouds and climate" *Nature*, Vol. 460, pp. 332-333 - 16 July 2009.
- Chumakov, N. M., 2008 "A Problem of Total Glaciations on the Earth in the Late Precambrian" *Stratigraphy and Geological Correlation*, Vol. 16, No. 2, pp. 107-119.
- Crowley, T. J. and W. T. Hyde, 2008 "Transient nature of late Pleistocene climate variability" *Nature*, Vol. 456, pp. 226-230 - 13 November 2008.
- Crutzen, P. J., 2006 "Albedo enhancement by stratospheric sulphur injections: a contribution to resolve a policy dilemma?" *Climatic Change*, Vol. 77, pp. 211-219.
- EPICA community members, 2004 "Eight glacial cycles from an Antarctic ice core" *Nature*, Vol. 429, pp. 623-628 - 10 June 2004.
- ExxonMobil, 2008 "The Outlook for Energy - A View to 2030" December 2008.
- Fairchild, I. J. and M. J. Kennedy, 2007 "Neoproterozoic glaciation in the Earth System" *J. Geol. Soc. Lond.*, Vol. 164, issue 5, pp.895-921.
- Hoffert, M. I. et al., 1998 "Energy implications of future stabilization of atmospheric CO₂ content" *Nature*, Vol. 395, pp. 881-884 - 29 October 1998.
- Hoffert, M. I. et al., 2002 "Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet" *Science*, Vol. 298, pp. 981-987 - 1 November 2002.
- IPCC, 2007a "Climate Change 2007 - The Physical Science Basis - Technical Summary - TS.2 Changes in Human and Natural Drivers of Climate - TS.2.1

- Greenhouse Gases – TS.2.1.1 Changes in Atmospheric Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide” <<http://www.ipcc.ch/>>.
- IPCC, 2007b “Climate Change 2007 – The Physical Science Basis – Technical Summary – TS.2 Changes in Human and Natural Drivers of Climate – TS.2.1 Greenhouse Gases – TS.2.1.3 Changes in Atmospheric Halocarbons, Stratospheric Ozone, Tropospheric Ozone and Other Gases” <<http://www.ipcc.ch/>>.
- IPCC, 2007c “Climate Change 2007 – The Physical Science Basis – 10 Global Climate Projections – 10.1 Introduction” <<http://www.ipcc.ch/>>.
- IPCC, 2007d “Climate Change 2007 – Synthesis Report – 5. The long-term perspective – 5.5 Technology flows and development” <<http://www.ipcc.ch/>>.
- Jones, N., 2009 “Sucking it up” *Nature*, Vol. 458, pp. 1094-1097 – 30 April 2009.
- Joos, F. et al., 1996 “An efficient and accurate representation of complex oceanic and biospheric models of anthropogenic carbon uptake” *Tellus B*, Vol. 48, pp. 397–417.
- Keith, D. W., 2001 “Geoengineering” *Nature*, Vol. 409, p. 420 – 18 January 2001.
- Kennedy, M. et al., 2008 “Snowball Earth termination by destabilization of equatorial permafrost methane clathrate” *Nature*, Vol.453, pp. 642-645 – 29 May 2008.
- Lenton, T. M. and N. E. Vaughan, 2009 “The radiative forcing potential of different climate geoengineering options” *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, Vol. 9, pp. 2559–2608.
- Metz, B. et al., Eds., 2001 “Climate Change 2001: Mitigation” *Cambridge Univ. Press*, New York, p.8.
- Monastersky, R., 2009 “A burden beyond bearing” *Nature*, Vol. 458, pp. 1091-1094 – 30 April 2009.
- Morton, O., 2009 “Great white hope” *Nature*, Vol. 458, pp. 1097-1100 – 30 April 2009.
- Mueller, U. C. and J. Pross, 2007 “Lesson from the past: present insolation minimum holds potential for glacial inception” *Quaternary Science Review*, Vol. 26, pp. 3025-3029.
- Parry, M. et al., 2009 “Overshoot, adapt and recover” *Nature*, Vol. 458, pp. 1102-1103 – 30 April 2009.
- Royal Society, 2009 “Geoengineering the climate – Science, governance and uncertainty” Report 10/09 – RS1636 – September 2009.
- Ruddiman, W. F., 2005 “Quando iniziamo ad alterare il clima” *Le Scienze*, 31 maggio 2005.
- Ruddiman, W. F., 2008 “The challenge of modeling interglacial CO₂ and CH₄ trends” *Quaternary Science Reviews*, 27, pp. 445–448.
- Schneider, S. H., 2001 “Earth systems engineering and management” *Nature*, Vol. 409, pp. 417-421 – 18 January 2001.

- Severinghaus, J. P., 2009 "Southern see-saw seen" *Nature*, Vol. 457, pp. 1093-1094 - 26 February 2009.
- Svensmark, H., 2007 "Cosmoclimatology: a new theory emerges" *A&G*, Vol. 48, pp. 1.18-1.24 - February 2007.
- Teller, E. e al., 2004 "Active climate stabilization" *Tyndall Centre and Cambridge-MIT Institute - Symposium on Macro-Engineering Options For Climate Change Management and Mitigation*, Isaac Newton Institute, Cambridge, England, 7-9 January 2004.
- Virgoe, J., 2009 "International governance of a possible geoengineering intervention to combat climate change" *Climatic Change*, Vol. 95, pp. 103-119.
- Wigley, T. M. L. et al., 1996 "Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentration" *Nature*, Vol. 379, pp. 240-243 - 18 January 1996.
- Wigley, T. M. L., 2006 "A Combined Mitigation/Geoengineering Approach to Climate Stabilization" *Science*, Vol. 314, pp. 452-454 - 20 October 2006.
- Zachos, J. et al., 2001 "Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present" *Science*, Vol. 292, pp. 686-693 - 27 April 2001.