



Titolo

La scienza al di là del bene e del male
Le nuove sfide della ricerca e la questione morale

Autore

Angelo Genovesi

Volume edito a cura della

FONDAZIONE ACHILLE E GIULIA BOROLI

Progetto grafico

Studio CREE – Milano

Realizzazione editoriale

EDITING s.r.l.

Redazione e impaginazione

GRÁPHEIN s.r.l.

Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta o trasmessa in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo elettronico, meccanico o altro senza l'autorizzazione scritta dei proprietari dei diritti e dell'editore

info@fondazioneaegboroli.com

© 2004 Fondazione Achille e Giulia Boroli

Finito di stampare nel mese di ottobre 2004
a cura di Officine Grafiche Novara 1901 S.p.A.

Edizione fuori commercio

HOMO SAPIENS

ANGELO GENOVESI
LA SCIENZA AL DI LÀ
DEL BENE E DEL MALE

LE NUOVE SFIDE DELLA RICERCA
E LA QUESTIONE MORALE

FONDAZIONE ACHILLE E GIULIA BOROLI

LA FONDAZIONE ACHILLE E GIULIA BOROLI

Nel 1988 Achille Boroli, oggi presidente onorario di De Agostini Editore Spa, ha fondato l'ente che porta il suo nome e quello della moglie Giulia e lo ha dotato di un importante fondo con capitali personali; in questa iniziativa si manifesta la precisa volontà del fondatore di continuare a essere concretamente presente all'interno della società civile con attività di supporto a enti pubblici e privati, laici e religiosi, già operante nel campo della ricerca scientifica, della charity e della cultura nel senso più ampio del termine: in questo ambito, e più precisamente in conformità con uno degli obiettivi statuari, è nata questa iniziativa editoriale che esprime la volontà di supportare la conoscenza e l'approfondimento dei grandi temi dell'attualità da parte delle più giovani classi di età, al fine di favorire la comprensione del mondo sempre più complesso e problematico in cui viviamo.

Questa iniziativa si affianca a un'altra attività ormai tradizionale della Fondazione, che assegna borse di studio in favore degli studenti meritevoli per favorirne l'iscrizione all'Università.

Editore di successo, animato da una fede intatta nei valori della cultura e della lettura come strumento insuperato di comunicazione, Achille Boroli ha fortemente voluto che la Fondazione realizzasse la collana di libri che oggi presentiamo ai giovani, fiduciosi che l'informazione, la libera riflessione e il pensiero contribuiranno alla formazione dei cittadini del futuro.

SOMMARIO

Introduzione

Parte prima – Energia e ambiente

Che cos'è l'energia

- 13 1. Grandezze fisiche
- 13 2. Lavoro ed energia
- 15 3. Energia cinetica ed energia potenziale
- 18 4. Temperatura e calore
- 19 5. Due principi

Che cos'è l'ambiente

- 21 1. Definizione di ambiente
- 22 2. Fattori ambientali e condizioni limitanti
- 23 3. L'ambiente Terra

Le fonti di energia

- 25 1. Energia primaria e secondaria
- 26 2. Le risorse energetiche rinnovabili
- 31 3. Le risorse energetiche non rinnovabili
- 38 4. L'idrogeno

Il surriscaldamento del pianeta

- 41 1. Che cos'è una serra
- 41 2. L'equilibrio termico terrestre
- 43 3. Il clima
- 45 4. I cosiddetti gas “serra”
- 48 5. Energia e ambiente
- 50 6. Che cosa ci dovremo aspettare?

Il dilemma nucleare

- 55 1. Che cos'è una centrale nucleare
- 58 2. Reattori termici e reattori veloci autofertilizzanti
- 61 3. I nodi da sciogliere

Considerazioni etiche

Parte seconda – Genetica e informazione

Genetica

- 79 1. La cellula
- 84 2. I cromosomi
- 85 3. Il Dna
- 88 4. I geni

Allarme Ogm?

- 91 1. Il miglioramento genetico
- 95 2. Ingegneria genetica
- 98 3. Organismi geneticamente modificati
- 104 4. La clonazione

Informazione

- 107 1. Che cos'è l'informatica
- 108 2. Il computer
- 113 3. Che cos'è Internet
- 117 4. L'Intelligenza Artificiale

Considerazioni etiche

- 125 1. Il principio di precauzione
- 126 2. Priorità ed equità
- 128 3. Educare alla responsabilità
- 128 4. Biodiversità e impatto ambientale
- 129 5. Autonomia e informazione
- 130 6. Brevetti viventi
- 131 7. Dignità umana e clonazione
- 135 8. Informazione e partecipazione

Conclusione

Bibliografia

INTRODUZIONE

Lo scopo di ciò che chiamiamo scienza, scriveva Albert Einstein nel 1951 all'amico Maurice Solovine, è "quello di stabilire ciò che è"¹. In altri termini, il metodo scientifico può solo dirci in che modo i fatti sono tra loro collegati e come si condizionano vicendevolmente. Non è poco; anzi, precisa il padre della teoria della relatività, "l'aspirazione a una tale conoscenza oggettiva è una delle più elevate di cui l'uomo sia capace, e certo non mi sospetterete di voler sminuire le conquiste e gli sforzi eroici dell'uomo in questo campo"². È, questo, uno dei due modi in cui, secondo il fisico tedesco, la scienza influisce sull'esistenza umana: opera e investe sullo spirito, lo educa e lo conduce ad affermare non solo che il pensiero dell'uomo è degno di fiducia ma anche, e soprattutto, che le leggi naturali sono universali, valgono per tutti e ovunque. Vi è un secondo modo attraverso il quale la conoscenza incide profondamente sulla nostra esistenza: una modalità sicuramente molto ben visibile e percepibile dallo stesso senso comune, che non può non meravigliarsi delle invenzioni e delle applicazioni pratiche delle conoscenze teoriche e, al contempo, prender atto che lo stesso progresso tecnologico comporta scelte decisive. "La tecnologia, o scienza applicata – afferma infatti Einstein – ha posto l'uomo di fronte a problemi di estrema gravità. La sopravvivenza stessa dell'umanità dipende da una soddisfacente soluzione di tali problemi"³.

Di fronte ai pericoli derivanti non certo dalla scienza e, forse, nemmeno dalla tecnologia in quanto tale, bensì dalla sua non corretta e adeguata gestione, Einstein pone esplicitamente il problema del valore, la questione etica. Non può essere altrimenti, giacché "la co-

¹ A. EINSTEIN, *Lettres à Maurice Solovine*, Paris, Gauthier-Villars 1956, p. 105.

² A. EINSTEIN, *Out of My Later Years*, New York, Philosophical Library 1950; trad. it. L. Bianchi, *Pensieri degli anni difficili*, Torino, Universale scientifica Boringhieri 1965, pp. 108-109.

³ *Ibidem*, pp. 30-31.

noscenza di ciò che è non apre direttamente la porta alla conoscenza di ciò che *dovrebbe essere*. Si può avere la conoscenza più chiara e più completa di ciò che è, e tuttavia non riuscire a dedurre da questa quale dovrebbe essere la meta delle nostre aspirazioni umane. La conoscenza obiettiva ci fornisce strumenti potenti per la conquista di certe mete, ma il fine ultimo e il desiderio di raggiungerlo devono nascere da un'altra fonte"⁴.

In questa prospettiva ci proponiamo di affrontare alcune tra le più urgenti e cruciali problematiche del nostro tempo, che ci è sembrato di poter collocare all'interno di due tematiche generali: la prima, considera il rapporto tra l'energia e l'ambiente, la seconda, mette in relazione la genetica e l'informazione. Nella prima parte di questo lavoro, a partire dalle nozioni di "energia" e di "ambiente", si discutono le diverse fonti energetiche per poi affrontare il grave fenomeno rappresentato dal surriscaldamento del pianeta; nella seconda parte, sulla base degli elementi costitutivi della vita, dalla "cellula" al "Dna", si dedica particolare attenzione agli interrogativi sollevati dagli organismi geneticamente modificati (*Ogm*) o transgenici, per soffermarsi infine sulla scienza dell'informazione e ciò che, attraverso un vero e proprio artificio linguistico, è indicata come "intelligenza artificiale".

Al termine di ciascuna delle due parti sono poste delle considerazioni di carattere morale. La loro giustificazione si fonda sulla convinzione che i temi discussi possono essere efficacemente affrontati solo nella piena consapevolezza di due limiti invalicabili. Il primo è determinato dalla struttura stessa della realtà naturale così come noi la conosciamo, e verso la quale dobbiamo costantemente indirizzare le nostre pretese teoriche e le aspettative pratiche; per questo, se dobbiamo considerare una chimera il "moto perpetuo", per converso siamo messi di fronte all'eventualità di sconvolgimenti tanto radicali quanto devastanti dell'ambiente in cui viviamo per l'impatto che su di esso può esercitare il nostro operato. Il secondo limite è strettamente collegato alla nostra peculiare natura di soggetti coscienti e autocoscienti: ciò che ci pone sul gradino più alto dell'evoluzione della vita ci avverte anche che l'uomo non può oltrepassare la soglia della sua stessa umanità, che non è creativa ma che, proprio per questo, resta e deve rimanere a fondamento di ogni altro valore.

⁴ Einstein, *Out of My...* cit., p. 109.

INTRODUZIONE

Lo scopo di ciò che chiamiamo scienza, scriveva Albert Einstein nel 1951 all'amico Maurice Solovine, è "quello di stabilire ciò che è"¹. In altri termini, il metodo scientifico può solo dirci in che modo i fatti sono tra loro collegati e come si condizionano vicendevolmente. Non è poco; anzi, precisa il padre della teoria della relatività, "l'aspirazione a una tale conoscenza oggettiva è una delle più elevate di cui l'uomo sia capace, e certo non mi sospetterete di voler sminuire le conquiste e gli sforzi eroici dell'uomo in questo campo"². È, questo, uno dei due modi in cui, secondo il fisico tedesco, la scienza influisce sull'esistenza umana: opera e investe sullo spirito, lo educa e lo conduce ad affermare non solo che il pensiero dell'uomo è degno di fiducia ma anche, e soprattutto, che le leggi naturali sono universali, valgono per tutti e ovunque. Vi è un secondo modo attraverso il quale la conoscenza incide profondamente sulla nostra esistenza: una modalità sicuramente molto ben visibile e percepibile dallo stesso senso comune, che non può non meravigliarsi delle invenzioni e delle applicazioni pratiche delle conoscenze teoriche e, al contempo, prender atto che lo stesso progresso tecnologico comporta scelte decisive. "La tecnologia, o scienza applicata – afferma infatti Einstein – ha posto l'uomo di fronte a problemi di estrema gravità. La sopravvivenza stessa dell'umanità dipende da una soddisfacente soluzione di tali problemi"³.

Di fronte ai pericoli derivanti non certo dalla scienza e, forse, nemmeno dalla tecnologia in quanto tale, bensì dalla sua non corretta e adeguata gestione, Einstein pone esplicitamente il problema del valore, la questione etica. Non può essere altrimenti, giacché "la co-

¹ A. EINSTEIN, *Lettres à Maurice Solovine*, Paris, Gauthier-Villars 1956, p. 105.

² A. EINSTEIN, *Out of My Later Years*, New York, Philosophical Library 1950; trad. it. L. Bianchi, *Pensieri degli anni difficili*, Torino, Universale scientifica Boringhieri 1965, pp. 108-109.

³ *Ibidem*, pp. 30-31.

noscenza di ciò che è non apre direttamente la porta alla conoscenza di ciò che *dovrebbe essere*. Si può avere la conoscenza più chiara e più completa di ciò che è, e tuttavia non riuscire a dedurre da questa quale dovrebbe essere la meta delle nostre aspirazioni umane. La conoscenza obiettiva ci fornisce strumenti potenti per la conquista di certe mete, ma il fine ultimo e il desiderio di raggiungerlo devono nascere da un'altra fonte"⁴.

In questa prospettiva ci proponiamo di affrontare alcune tra le più urgenti e cruciali problematiche del nostro tempo, che ci è sembrato di poter collocare all'interno di due tematiche generali: la prima, considera il rapporto tra l'energia e l'ambiente, la seconda, mette in relazione la genetica e l'informazione. Nella prima parte di questo lavoro, a partire dalle nozioni di "energia" e di "ambiente", si discutono le diverse fonti energetiche per poi affrontare il grave fenomeno rappresentato dal surriscaldamento del pianeta; nella seconda parte, sulla base degli elementi costitutivi della vita, dalla "cellula" al "Dna", si dedica particolare attenzione agli interrogativi sollevati dagli organismi geneticamente modificati (*Ogm*) o transgenici, per soffermarsi infine sulla scienza dell'informazione e ciò che, attraverso un vero e proprio artificio linguistico, è indicata come "intelligenza artificiale".

Al termine di ciascuna delle due parti sono poste delle considerazioni di carattere morale. La loro giustificazione si fonda sulla convinzione che i temi discussi possono essere efficacemente affrontati solo nella piena consapevolezza di due limiti invalicabili. Il primo è determinato dalla struttura stessa della realtà naturale così come noi la conosciamo, e verso la quale dobbiamo costantemente indirizzare le nostre pretese teoriche e le aspettative pratiche; per questo, se dobbiamo considerare una chimera il "moto perpetuo", per converso siamo messi di fronte all'eventualità di sconvolgimenti tanto radicali quanto devastanti dell'ambiente in cui viviamo per l'impatto che su di esso può esercitare il nostro operato. Il secondo limite è strettamente collegato alla nostra peculiare natura di soggetti coscienti e autocoscienti: ciò che ci pone sul gradino più alto dell'evoluzione della vita ci avverte anche che l'uomo non può oltrepassare la soglia della sua stessa umanità, che non è creativa ma che, proprio per questo, resta e deve rimanere a fondamento di ogni altro valore.

⁴ Einstein, *Out of My...* cit., p. 109.

CHE COS'È L'ENERGIA

1. Grandezze fisiche

L'energia è anzitutto una grandezza fisica, ovvero un ente. Questo ente compare nello studio dei fenomeni fisici ed è suscettibile di essere quantitativamente espresso attraverso un numero che ne determina il valore (ad esempio, 2 metri sono una grandezza). Se l'ente viene considerato non più dal punto di vista quantitativo ma qualitativo, allora non si parla di grandezza ma più opportunamente di specie di grandezza (la lunghezza è ad esempio una specie di grandezza). In generale, le grandezze sono dunque suscettibili di aumento e di diminuzione.

Le grandezze fisiche possono essere di due tipi: scalari o vettoriali. Una grandezza fisica è detta scalare quando un solo numero basta a definirla completamente rispetto a una determinata scala di riferimento: il volume, la massa, la temperatura, il tempo, l'energia ecc. sono tutte specie di grandezze scalari. Una grandezza fisica è detta vettoriale quando, per essere interamente definita, al suo *valore numerico* devono essere aggiunti i simboli di *direzione* e di *verso*. Non è sufficiente dire che un ciclista ha percorso 20 chilometri, è necessario anche indicare e precisare la direzione e il verso del moto compiuto. Lo spostamento di un corpo, la velocità, l'accelerazione, la forza ecc. sono tutte specie di grandezze vettoriali perché rappresentate da *vettori*, cioè da segmenti orientati da una freccia che ne determina la direzione e il verso; la lunghezza del vettore, denominata *modulo*, ne misura l'intensità rispetto a una determinata unità fissata in precedenza.

2. Lavoro ed energia

Già sul piano puramente intuitivo il concetto di energia è strettamente legato a quello di lavoro; ogni nostra singola azione richiede energia, ed è tale in quanto, per giungere a compimento,

compie un lavoro. In questo senso, la possibilità offerta dai nostri muscoli di compiere un'azione, ad esempio applicando la loro forza a un oggetto spostandolo per una certa distanza lungo una superficie, si identifica con la nostra capacità di compiere un lavoro. Di primo acchito potremmo dunque dire che il lavoro è il prodotto scalare di una forza applicata a un corpo per la distanza (spostamento) su cui tale forza agisce sul corpo. Così, se la direzione dello spostamento si identifica con quella della forza applicata, sicché forza e spostamento hanno la stessa direzione e lo stesso verso, il lavoro speso dalla forza F per muovere e spostare l'oggetto di massa m lungo la distanza s è

$$L = Fs$$

La nostra definizione non è tuttavia completa; in effetti, se la direzione della forza diverge e forma un angolo φ con la direzione del moto, tale forza può essere vista come la somma vettoriale di due forze indipendenti, cioè le componenti x ed y . La componente x è diretta lungo lo spostamento, sicché il lavoro compiuto è

$$F_x = Fs \cos \varphi$$

Nella direzione y non si ha spostamento, dunque la componente F_y non compie lavoro. Detto altrimenti, se la forza applicata e lo spostamento ottenuto dell'oggetto hanno direzioni diverse, il lavoro è compiuto solo dalla componente della forza nella direzione dello spostamento, cioè

$$L = Fs \cos \varphi$$

Definiremo allora il lavoro L come il prodotto scalare della forza F nella direzione dello spostamento s per il valore dello spostamento prodotto dalla forza. Ne segue che il lavoro L può esser detto positivo, negativo o nullo.

Il lavoro L è positivo se lo spostamento s dovuto all'azione della forza F che si esercita sul corpo ha la stessa direzione e verso della forza applicata.

Il lavoro L è negativo se lo spostamento s dovuto all'azione della forza F che si esercita sul corpo ha direzione e verso opposti alla forza stessa.

Il lavoro L è infine nullo in due casi: anzitutto, se la forza F che si esercita sul corpo non produce alcuno spostamento di quest'ultimo, sicché è essa stessa nulla; in secondo luogo, se lo spostamento e la forza F sono tra loro perpendicolari, come accade quando trasportiamo un bagaglio a mano lungo una direttrice orizzontale.

Lavoro ed energia sono così la stessa cosa, visto che un corpo o un sistema di corpi possiede energia quando è in grado di compiere un lavoro: entrambe queste specie di grandezze si misurano in *joule* (J), corrispondente al lavoro che effettua una forza di un Newton per spostare il suo punto di applicazione nella sua stessa direzione e verso per 1 metro.

3. Energia cinetica ed energia potenziale

Dal punto di vista meccanico si distinguono due forme di energia: la forza viva o *energia cinetica* e l'*energia di posizione o potenziale*.

Consideriamo un corpo in quiete; se a esso viene applicata una forza costante F , il corpo accelera e, dopo aver percorso un certo tratto pari alla distanza s , acquista la velocità v , che dunque sarà data dal prodotto dell'accelerazione per il tempo. Abbiamo perciò:

$$F = ma$$

La distanza s percorsa sarà allora uguale a

$$s = \frac{1}{2} at^2$$

ora,

$$v = at$$

sicché il lavoro

$$L = Fs = (ma) (\frac{1}{2} at^2) = \frac{1}{2} m(at)^2$$

ovvero

$$L = \frac{1}{2} mv^2$$

L'energia acquisita dal nostro corpo esclusivamente in virtù del suo movimento si chiama *energia cinetica* (E_c) e, come è evidente, dipende esclusivamente dalla velocità v del corpo e dalla sua massa m .

L'energia cinetica rappresenta il massimo lavoro che un corpo può realizzare grazie al suo movimento; per converso, il lavoro contro le forze esterne rappresenta una diminuzione della sua energia cinetica.

Consideriamo nuovamente il nostro corpo di massa m : solleviamolo fino a raggiungere una posizione che corrisponde all'altezza h dal suolo assunto come riferimento, restituendogli così lo stato di quiete. Con l'operazione appena descritta abbiamo compiuto un lavoro contro la forza di gravità pur non avendo fatto entrare in gioco la velocità. E in effetti, il nostro corpo campione non ha guadagnato alcuna energia cinetica, benché possieda in ogni caso un'energia in virtù della posizione raggiunta; se infatti lasciamo cadere il nostro corpo di massa m dall'altezza h , l'energia in esso contenuta per la posizione, la sua *energia potenziale* (E_p) gravitazionale di posizione, si trasforma in energia di movimento, cioè energia cinetica. Possiamo dunque affermare che un corpo portato a un'altezza h possiede un'energia potenziale pari a

Mgh ovvero Fh , dal momento che g altro non è se non l'accelerazione gravitazionale.

Ogni corpo presente sulla Terra possiede un'energia di posizione o potenziale gravitazionale: il lavoro compiuto per vincere la forza gravitazionale terrestre viene conservato sotto forma di energia potenziale che può sempre trasformarsi in energia cinetica.

Il pendolo semplice rappresenta un'efficace illustrazione del trasformarsi dell'energia potenziale in energia cinetica e viceversa; esso consiste semplicemente in un filo considerato inestensibile di massa trascurabile e di lunghezza l , la cui estremità superiore è vincolata mentre quella inferiore è dotata di un corpo di massa m . Se il pendolo, portato nella posizione destra o sinistra, e formando così un angolo α con la perpendicolare, viene lasciato libero, inizia a oscillare intorno alla posizione di equilibrio 0 . Quando il pendolo raggiunge il punto più alto all'uno o all'altro capo dell'oscillazione, e sta per invertire il senso del moto (da A a B , da B ad A), resta per un istante sospeso con velocità nulla, ma immediatamente pronto a muoversi verso il basso in direzione dell'altro estremo. Orbene, proprio in quell'istante di sospensione la sua energia cinetica è zero, mentre è massima la sua energia potenziale. Allorché il pendolo precipita verso il punto più bas-

so, punto che dipende dal vincolo che lo lega al suo perno, raggiungendolo esso acquista, nel punto 0 , la massima energia cinetica, ovvero annulla totalmente la sua energia potenziale. La massa oscillante m , costretta a scorrere lungo una precisa traiettoria geometrica, risale poi verso l'alto con una progressiva attenuazione della velocità. Che cosa accade nei punti intermedi del percorso? Nel corso del tragitto il pendolo mantiene costante la somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale, e tale costante è appunto uguale al massimo valore dell'una o dell'altra.

Si giunge così ad affermare il *principio di conservazione dell'energia meccanica*, secondo il quale l'energia meccanica data dalla somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale si conserva durante il processo. Un risultato, quest'ultimo, al quale si perviene ogni volta che nel processo intervengono forze di natura *conservativa*, cioè forze caratterizzate dalla proprietà per cui il lavoro compiuto dipende solo dalla posizione iniziale e finale del loro punto di applicazione. Che l'energia si conservi non è tuttavia sufficiente: essa è infatti di tante specie e qualità; soprattutto, se le forze prese in considerazione non sono più conservative ma *dissipative*, come l'attrito, il principio di conservazione può ancora essere considerato valido, ma solo se si tiene conto di tutte le possibili forme in cui parte dell'energia posseduta dal corpo potrà essere trasformata, ad esempio in energia termica, calore, nel caso dell'attrito. Ma tutte queste possibili forme di energia non potranno essere più recuperate come energia meccanica. Consideriamo ancora una volta il nostro pendolo semplice. Nel descrivere il suo funzionamento abbiamo intenzionalmente trascurato tutto ciò che non fosse direttamente riferibile al reciproco alternarsi di massima energia cinetica e potenziale. In realtà la loro somma resta costante per intervalli assai brevi. Alla lunga, la presenza di inevitabili dissipazioni attenua lentamente ma inesorabilmente l'ampiezza delle oscillazioni facendo apparentemente svanire nel nulla l'energia in precedenza ostentata dal pendolo. I molteplici effetti di dispersione indicano che in questo processo la resistenza dell'aria svolge un suo gioco, come del resto lo sfregamento del filo che collega il perno di oscillazione alla massa m oscillante. Si comprende allora che l'energia meccanica non si conserva quando intervengono forze che, come l'attrito, partendo da una posizione e ritornando a essa non danno luogo a un lavoro nullo. Ma l'energia non svanisce affatto, si trasferisce semplicemente nell'aria circostante, che è a sua volta smossa, e nel logoramento del perno.

4. Temperatura e calore

Se mettiamo a confronto due corpi, ad esempio un pezzo di legno e un chicco di grandine, diremo immediatamente, alla prova del tatto, che il primo è più caldo mentre il secondo genera in noi una marcata sensazione di freddo. La sensazione di caldo o di freddo è misurata dalla temperatura, ossia da quella specie di grandezza che esprime la nozione soggettiva di stato termico: due corpi messi a contatto diretto sono caratterizzati dalla stessa temperatura se non vi è passaggio di calore dall'uno all'altro. Se invece il passaggio ha effettivamente luogo, è a temperatura maggiore, quello che cede calore, e a temperatura minore, quello che ne riceve. Differenze di temperatura rappresentano quindi un dislivello termico. Per ottenere una misura quantitativa della temperatura si ricorre agli effetti fisici che essa produce, come la variazione del volume del corpo sottoposto al cambiamento. Non bisogna tuttavia confondere la temperatura con la quantità di calore: la fiamma di un fiammifero da cucina ha una temperatura assai più elevata dell'acqua contenuta nella vasca da bagno; quest'ultima, tuttavia, possiede una quantità di calore di gran lunga superiore a quella propria della fiammella del fiammifero. Il calore, in definitiva, è un ente fisico, la quantità di calore una specie di grandezza che definisce quantitativamente il calore. E infatti, dal momento che sfruttando una certa quantità di calore si può compiere un lavoro ben definito, la quantità di calore o energia termica deve essere considerata come vera e propria energia, sicché esprimibile utilizzando le medesime unità di misura. L'unità di misura termica è la *caloria*; essa corrisponde alla quantità di calore che occorre cedere a un grammo di acqua per elevare la sua temperatura di 1 °C da 14,5 °C a 15,5 °C. L'energia corrispondente a una caloria è uguale a 4,186 J.

Dal punto di vista fisico potremo dunque dire che il calore è una forma di energia che si trasferisce tra due corpi o tra due parti di uno stesso corpo, che si trovano in condizioni di temperatura diverse: è un'energia che scorre sempre dai punti che presentano maggiore temperatura a punti che registrano una temperatura minore; si tratta infine di un processo che si propaga seguendo non un'unica modalità bensì attraverso tre meccanismi diversi, e che tuttavia possono aver luogo contemporaneamente, ovvero per conduzione, per convezione e per irraggiamento.

La propagazione del calore per *conduzione* avviene per contatto tra

elementi solidi (benché a rigore la cosa si verifichi anche nei fluidi a causa degli urti tra gli atomi e le molecole), e determina il fenomeno per cui il calore trasmesso dal carbone rovente a un estremo di un'asta di ferro transita lungo la stessa fino all'estremità opposta. La propagazione del calore per *convezione* è inerente alla diffusione del calore nei fluidi, e si compie con uno spostamento di materia, come nel caso dell'acqua contenuta nel bollitore che raggiunge una determinata temperatura mediante il semplice contatto della parte inferiore del contenitore con la fiamma del fornello, e conseguente spostamento dell'acqua nella parte più alta del recipiente medesimo.

La propagazione del calore per *irraggiamento* avviene senza contatto; l'energia termica fluisce sotto forma di onde elettromagnetiche, come accade quando, durante un bivacco all'aperto in alta montagna, ci si scalda intorno a un fuoco, il cui tepore raggiunge il nostro corpo.

5. Due principi

Si è detto che il calore è una forma di energia che può essere trasformata in lavoro e che, per converso, il lavoro meccanico compiuto dall'attrito appare sotto forma di calore o energia termica dei corpi che lo subiscono. La Termodinamica è appunto l'ambito della scienza fisica che ha come oggetto le relazioni tra il calore e il lavoro, relazioni che si fondano su alcuni principi.

Il *primo principio* della Termodinamica, riprendendo quanto già acquisito sul terreno della Meccanica, afferma che l'energia non si crea, ma neppure si distrugge; essa, semplicemente, si trasforma, può cioè passare da una forma all'altra. Il che significa che non può esistere una macchina in grado di compiere un lavoro senza consumare energia.

Per il *secondo principio* della Termodinamica il calore non si trasforma mai interamente in lavoro. Si tratta di una ulteriore, rigorosa condizione cui è sottoposta ogni trasformazione termodinamica effettivamente realizzabile, cioè realmente praticabile. In effetti, il calore passa sempre in modo *spontaneo* da corpi caldi a corpi freddi. L'aggettivo *spontaneo* determina questa condizione. Se immergiamo una sbarra di ferro arroventata in un recipiente pieno d'acqua fredda avremo come effetto un progressivo raffreddarsi della sbarra e al contempo un riscaldamento altrettanto progressivo dell'acqua. Ma

potremo attendere quanto tempo vorremo: l'effetto inverso non si realizzerà mai, cioè non assisteremo al progressivo raffreddarsi dell'acqua e, al contempo, al progressivo surriscaldarsi della sbarra di ferro. Niente vieta, si badi bene, che il calore possa passare da un corpo freddo a un corpo caldo, come avviene nei refrigeratori; solo che questo tipo di passaggio, per essere reale, cioè effettivamente realizzato, richiede un lavoro, ovvero non può avvenire *spontaneamente*. Si stabilisce in questo modo che per ogni trasformazione di energia in un sistema isolato, cioè privo di influenze e perturbazioni esterne, se l'energia totale implicata in un processo è sempre costante, la quantità di energia utile per compiere un lavoro diminuisce, dissipandosi in calore, attrito ecc. La degradazione è appunto il passaggio da una forma di energia a un'altra che non può essere accompagnata dalla trasformazione inversa completa, il che necessita l'introduzione di una nuova quantità o grandezza, l'entropia. Questa grandezza esprime la degradazione di energia che avviene sempre in ogni trasformazione; la sua unità di misura è *Joule/Kelvin (J/K)*. Concretamente ciò ci dice che non esiste una macchina che abbia un'efficienza totale pari a 1, nel senso che non tutta la differenza tra calore sottratto e calore ceduto si trasforma in lavoro.

CHE COS'È L'ENERGIA

1. Grandezze fisiche

L'energia è anzitutto una grandezza fisica, ovvero un ente. Questo ente compare nello studio dei fenomeni fisici ed è suscettibile di essere quantitativamente espresso attraverso un numero che ne determina il valore (ad esempio, 2 metri sono una grandezza). Se l'ente viene considerato non più dal punto di vista quantitativo ma qualitativo, allora non si parla di grandezza ma più opportunamente di specie di grandezza (la lunghezza è ad esempio una specie di grandezza). In generale, le grandezze sono dunque suscettibili di aumento e di diminuzione.

Le grandezze fisiche possono essere di due tipi: scalari o vettoriali. Una grandezza fisica è detta scalare quando un solo numero basta a definirla completamente rispetto a una determinata scala di riferimento: il volume, la massa, la temperatura, il tempo, l'energia ecc. sono tutte specie di grandezze scalari. Una grandezza fisica è detta vettoriale quando, per essere interamente definita, al suo *valore numerico* devono essere aggiunti i simboli di *direzione* e di *verso*. Non è sufficiente dire che un ciclista ha percorso 20 chilometri, è necessario anche indicare e precisare la direzione e il verso del moto compiuto. Lo spostamento di un corpo, la velocità, l'accelerazione, la forza ecc. sono tutte specie di grandezze vettoriali perché rappresentate da *vettori*, cioè da segmenti orientati da una freccia che ne determina la direzione e il verso; la lunghezza del vettore, denominata *modulo*, ne misura l'intensità rispetto a una determinata unità fissata in precedenza.

2. Lavoro ed energia

Già sul piano puramente intuitivo il concetto di energia è strettamente legato a quello di lavoro; ogni nostra singola azione richiede energia, ed è tale in quanto, per giungere a compimento,

CHE COS'È L'ENERGIA

1. Grandezze fisiche

L'energia è anzitutto una grandezza fisica, ovvero un ente. Questo ente compare nello studio dei fenomeni fisici ed è suscettibile di essere quantitativamente espresso attraverso un numero che ne determina il valore (ad esempio, 2 metri sono una grandezza). Se l'ente viene considerato non più dal punto di vista quantitativo ma qualitativo, allora non si parla di grandezza ma più opportunamente di specie di grandezza (la lunghezza è ad esempio una specie di grandezza). In generale, le grandezze sono dunque suscettibili di aumento e di diminuzione.

Le grandezze fisiche possono essere di due tipi: scalari o vettoriali. Una grandezza fisica è detta scalare quando un solo numero basta a definirla completamente rispetto a una determinata scala di riferimento: il volume, la massa, la temperatura, il tempo, l'energia ecc. sono tutte specie di grandezze scalari. Una grandezza fisica è detta vettoriale quando, per essere interamente definita, al suo *valore numerico* devono essere aggiunti i simboli di *direzione* e di *verso*. Non è sufficiente dire che un ciclista ha percorso 20 chilometri, è necessario anche indicare e precisare la direzione e il verso del moto compiuto. Lo spostamento di un corpo, la velocità, l'accelerazione, la forza ecc. sono tutte specie di grandezze vettoriali perché rappresentate da *vettori*, cioè da segmenti orientati da una freccia che ne determina la direzione e il verso; la lunghezza del vettore, denominata *modulo*, ne misura l'intensità rispetto a una determinata unità fissata in precedenza.

2. Lavoro ed energia

Già sul piano puramente intuitivo il concetto di energia è strettamente legato a quello di lavoro; ogni nostra singola azione richiede energia, ed è tale in quanto, per giungere a compimento,

compie un lavoro. In questo senso, la possibilità offerta dai nostri muscoli di compiere un'azione, ad esempio applicando la loro forza a un oggetto spostandolo per una certa distanza lungo una superficie, si identifica con la nostra capacità di compiere un lavoro. Di primo acchito potremmo dunque dire che il lavoro è il prodotto scalare di una forza applicata a un corpo per la distanza (spostamento) su cui tale forza agisce sul corpo. Così, se la direzione dello spostamento si identifica con quella della forza applicata, sicché forza e spostamento hanno la stessa direzione e lo stesso verso, il lavoro speso dalla forza F per muovere e spostare l'oggetto di massa m lungo la distanza s è

$$L = Fs$$

La nostra definizione non è tuttavia completa; in effetti, se la direzione della forza diverge e forma un angolo φ con la direzione del moto, tale forza può essere vista come la somma vettoriale di due forze indipendenti, cioè le componenti x ed y . La componente x è diretta lungo lo spostamento, sicché il lavoro compiuto è

$$F_x = Fs \cos \varphi$$

Nella direzione y non si ha spostamento, dunque la componente F_y non compie lavoro. Detto altrimenti, se la forza applicata e lo spostamento ottenuto dell'oggetto hanno direzioni diverse, il lavoro è compiuto solo dalla componente della forza nella direzione dello spostamento, cioè

$$L = Fs \cos \varphi$$

Definiremo allora il lavoro L come il prodotto scalare della forza F nella direzione dello spostamento s per il valore dello spostamento prodotto dalla forza. Ne segue che il lavoro L può esser detto positivo, negativo o nullo.

Il lavoro L è positivo se lo spostamento s dovuto all'azione della forza F che si esercita sul corpo ha la stessa direzione e verso della forza applicata.

Il lavoro L è negativo se lo spostamento s dovuto all'azione della forza F che si esercita sul corpo ha direzione e verso opposti alla forza stessa.

Il lavoro L è infine nullo in due casi: anzitutto, se la forza F che si esercita sul corpo non produce alcuno spostamento di quest'ultimo, sicché è essa stessa nulla; in secondo luogo, se lo spostamento e la forza F sono tra loro perpendicolari, come accade quando trasportiamo un bagaglio a mano lungo una direttrice orizzontale.

Lavoro ed energia sono così la stessa cosa, visto che un corpo o un sistema di corpi possiede energia quando è in grado di compiere un lavoro: entrambe queste specie di grandezze si misurano in *joule* (J), corrispondente al lavoro che effettua una forza di un Newton per spostare il suo punto di applicazione nella sua stessa direzione e verso per 1 metro.

3. Energia cinetica ed energia potenziale

Dal punto di vista meccanico si distinguono due forme di energia: la forza viva o *energia cinetica* e l'*energia di posizione o potenziale*.

Consideriamo un corpo in quiete; se a esso viene applicata una forza costante F , il corpo accelera e, dopo aver percorso un certo tratto pari alla distanza s , acquista la velocità v , che dunque sarà data dal prodotto dell'accelerazione per il tempo. Abbiamo perciò:

$$F = ma$$

La distanza s percorsa sarà allora uguale a

$$s = \frac{1}{2} at^2$$

ora,

$$v = at$$

sicché il lavoro

$$L = Fs = (ma) (\frac{1}{2} at^2) = \frac{1}{2} m(at)^2$$

ovvero

$$L = \frac{1}{2} mv^2$$

L'energia acquisita dal nostro corpo esclusivamente in virtù del suo movimento si chiama *energia cinetica* (E_c) e, come è evidente, dipende esclusivamente dalla velocità v del corpo e dalla sua massa m .

Il lavoro L è infine nullo in due casi: anzitutto, se la forza F che si esercita sul corpo non produce alcuno spostamento di quest'ultimo, sicché è essa stessa nulla; in secondo luogo, se lo spostamento e la forza F sono tra loro perpendicolari, come accade quando trasportiamo un bagaglio a mano lungo una direttrice orizzontale.

Lavoro ed energia sono così la stessa cosa, visto che un corpo o un sistema di corpi possiede energia quando è in grado di compiere un lavoro: entrambe queste specie di grandezze si misurano in *joule* (J), corrispondente al lavoro che effettua una forza di un Newton per spostare il suo punto di applicazione nella sua stessa direzione e verso per 1 metro.

3. Energia cinetica ed energia potenziale

Dal punto di vista meccanico si distinguono due forme di energia: la forza viva o *energia cinetica* e l'*energia di posizione o potenziale*.

Consideriamo un corpo in quiete; se a esso viene applicata una forza costante F , il corpo accelera e, dopo aver percorso un certo tratto pari alla distanza s , acquista la velocità v , che dunque sarà data dal prodotto dell'accelerazione per il tempo. Abbiamo perciò:

$$F = ma$$

La distanza s percorsa sarà allora uguale a

$$s = \frac{1}{2} at^2$$

ora,

$$v = at$$

sicché il lavoro

$$L = Fs = (ma) (\frac{1}{2} at^2) = \frac{1}{2} m(at)^2$$

ovvero

$$L = \frac{1}{2} mv^2$$

L'energia acquisita dal nostro corpo esclusivamente in virtù del suo movimento si chiama *energia cinetica* (E_c) e, come è evidente, dipende esclusivamente dalla velocità v del corpo e dalla sua massa m .

L'energia cinetica rappresenta il massimo lavoro che un corpo può realizzare grazie al suo movimento; per converso, il lavoro contro le forze esterne rappresenta una diminuzione della sua energia cinetica.

Consideriamo nuovamente il nostro corpo di massa m : solleviamolo fino a raggiungere una posizione che corrisponde all'altezza h dal suolo assunto come riferimento, restituendogli così lo stato di quiete. Con l'operazione appena descritta abbiamo compiuto un lavoro contro la forza di gravità pur non avendo fatto entrare in gioco la velocità. E in effetti, il nostro corpo campione non ha guadagnato alcuna energia cinetica, benché possieda in ogni caso un'energia in virtù della posizione raggiunta; se infatti lasciamo cadere il nostro corpo di massa m dall'altezza h , l'energia in esso contenuta per la posizione, la sua *energia potenziale* (E_p) gravitazionale di posizione, si trasforma in energia di movimento, cioè energia cinetica. Possiamo dunque affermare che un corpo portato a un'altezza h possiede un'energia potenziale pari a

Mgh ovvero Fh , dal momento che g altro non è se non l'accelerazione gravitazionale.

Ogni corpo presente sulla Terra possiede un'energia di posizione o potenziale gravitazionale: il lavoro compiuto per vincere la forza gravitazionale terrestre viene conservato sotto forma di energia potenziale che può sempre trasformarsi in energia cinetica.

Il pendolo semplice rappresenta un'efficace illustrazione del trasformarsi dell'energia potenziale in energia cinetica e viceversa; esso consiste semplicemente in un filo considerato inestensibile di massa trascurabile e di lunghezza l , la cui estremità superiore è vincolata mentre quella inferiore è dotata di un corpo di massa m . Se il pendolo, portato nella posizione destra o sinistra, e formando così un angolo α con la perpendicolare, viene lasciato libero, inizia a oscillare intorno alla posizione di equilibrio O . Quando il pendolo raggiunge il punto più alto all'uno o all'altro capo dell'oscillazione, e sta per invertire il senso del moto (da A a B , da B ad A), resta per un istante sospeso con velocità nulla, ma immediatamente pronto a muoversi verso il basso in direzione dell'altro estremo. Orbene, proprio in quell'istante di sospensione la sua energia cinetica è zero, mentre è massima la sua energia potenziale. Allorché il pendolo precipita verso il punto più bas-

so, punto che dipende dal vincolo che lo lega al suo perno, raggiungendolo esso acquista, nel punto 0 , la massima energia cinetica, ovvero annulla totalmente la sua energia potenziale. La massa oscillante m , costretta a scorrere lungo una precisa traiettoria geometrica, risale poi verso l'alto con una progressiva attenuazione della velocità. Che cosa accade nei punti intermedi del percorso? Nel corso del tragitto il pendolo mantiene costante la somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale, e tale costante è appunto uguale al massimo valore dell'una o dell'altra.

Si giunge così ad affermare il *principio di conservazione dell'energia meccanica*, secondo il quale l'energia meccanica data dalla somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale si conserva durante il processo. Un risultato, quest'ultimo, al quale si perviene ogni volta che nel processo intervengono forze di natura *conservativa*, cioè forze caratterizzate dalla proprietà per cui il lavoro compiuto dipende solo dalla posizione iniziale e finale del loro punto di applicazione. Che l'energia si conservi non è tuttavia sufficiente: essa è infatti di tante specie e qualità; soprattutto, se le forze prese in considerazione non sono più conservative ma *dissipative*, come l'attrito, il principio di conservazione può ancora essere considerato valido, ma solo se si tiene conto di tutte le possibili forme in cui parte dell'energia posseduta dal corpo potrà essere trasformata, ad esempio in energia termica, calore, nel caso dell'attrito. Ma tutte queste possibili forme di energia non potranno essere più recuperate come energia meccanica. Consideriamo ancora una volta il nostro pendolo semplice. Nel descrivere il suo funzionamento abbiamo intenzionalmente trascurato tutto ciò che non fosse direttamente riferibile al reciproco alternarsi di massima energia cinetica e potenziale. In realtà la loro somma resta costante per intervalli assai brevi. Alla lunga, la presenza di inevitabili dissipazioni attenua lentamente ma inesorabilmente l'ampiezza delle oscillazioni facendo apparentemente svanire nel nulla l'energia in precedenza ostentata dal pendolo. I molteplici effetti di dispersione indicano che in questo processo la resistenza dell'aria svolge un suo gioco, come del resto lo sfregamento del filo che collega il perno di oscillazione alla massa m oscillante. Si comprende allora che l'energia meccanica non si conserva quando intervengono forze che, come l'attrito, partendo da una posizione e ritornando a essa non danno luogo a un lavoro nullo. Ma l'energia non svanisce affatto, si trasferisce semplicemente nell'aria circostante, che è a sua volta smossa, e nel logoramento del perno.

4. Temperatura e calore

Se mettiamo a confronto due corpi, ad esempio un pezzo di legno e un chicco di grandine, diremo immediatamente, alla prova del tatto, che il primo è più caldo mentre il secondo genera in noi una marcata sensazione di freddo. La sensazione di caldo o di freddo è misurata dalla temperatura, ossia da quella specie di grandezza che esprime la nozione soggettiva di stato termico: due corpi messi a contatto diretto sono caratterizzati dalla stessa temperatura se non vi è passaggio di calore dall'uno all'altro. Se invece il passaggio ha effettivamente luogo, è a temperatura maggiore, quello che cede calore, e a temperatura minore, quello che ne riceve. Differenze di temperatura rappresentano quindi un dislivello termico. Per ottenere una misura quantitativa della temperatura si ricorre agli effetti fisici che essa produce, come la variazione del volume del corpo sottoposto al cambiamento. Non bisogna tuttavia confondere la temperatura con la quantità di calore: la fiamma di un fiammifero da cucina ha una temperatura assai più elevata dell'acqua contenuta nella vasca da bagno; quest'ultima, tuttavia, possiede una quantità di calore di gran lunga superiore a quella propria della fiammella del fiammifero. Il calore, in definitiva, è un ente fisico, la quantità di calore una specie di grandezza che definisce quantitativamente il calore. E infatti, dal momento che sfruttando una certa quantità di calore si può compiere un lavoro ben definito, la quantità di calore o energia termica deve essere considerata come vera e propria energia, sicché esprimibile utilizzando le medesime unità di misura. L'unità di misura termica è la *caloria*; essa corrisponde alla quantità di calore che occorre cedere a un grammo di acqua per elevare la sua temperatura di 1 °C da 14,5 °C a 15,5 °C. L'energia corrispondente a una caloria è uguale a 4,186 J.

Dal punto di vista fisico potremo dunque dire che il calore è una forma di energia che si trasferisce tra due corpi o tra due parti di uno stesso corpo, che si trovano in condizioni di temperatura diverse: è un'energia che scorre sempre dai punti che presentano maggiore temperatura a punti che registrano una temperatura minore; si tratta infine di un processo che si propaga seguendo non un'unica modalità bensì attraverso tre meccanismi diversi, e che tuttavia possono aver luogo contemporaneamente, ovvero per conduzione, per convezione e per irraggiamento.

La propagazione del calore per *conduzione* avviene per contatto tra

elementi solidi (benché a rigore la cosa si verifichi anche nei fluidi a causa degli urti tra gli atomi e le molecole), e determina il fenomeno per cui il calore trasmesso dal carbone rovente a un estremo di un'asta di ferro transita lungo la stessa fino all'estremità opposta. La propagazione del calore per *convezione* è inerente alla diffusione del calore nei fluidi, e si compie con uno spostamento di materia, come nel caso dell'acqua contenuta nel bollitore che raggiunge una determinata temperatura mediante il semplice contatto della parte inferiore del contenitore con la fiamma del fornello, e conseguente spostamento dell'acqua nella parte più alta del recipiente medesimo.

La propagazione del calore per *irraggiamento* avviene senza contatto; l'energia termica fluisce sotto forma di onde elettromagnetiche, come accade quando, durante un bivacco all'aperto in alta montagna, ci si scalda intorno a un fuoco, il cui tepore raggiunge il nostro corpo.

5. Due principi

Si è detto che il calore è una forma di energia che può essere trasformata in lavoro e che, per converso, il lavoro meccanico compiuto dall'attrito appare sotto forma di calore o energia termica dei corpi che lo subiscono. La Termodinamica è appunto l'ambito della scienza fisica che ha come oggetto le relazioni tra il calore e il lavoro, relazioni che si fondano su alcuni principi.

Il *primo principio* della Termodinamica, riprendendo quanto già acquisito sul terreno della Meccanica, afferma che l'energia non si crea, ma neppure si distrugge; essa, semplicemente, si trasforma, può cioè passare da una forma all'altra. Il che significa che non può esistere una macchina in grado di compiere un lavoro senza consumare energia.

Per il *secondo principio* della Termodinamica il calore non si trasforma mai interamente in lavoro. Si tratta di una ulteriore, rigorosa condizione cui è sottoposta ogni trasformazione termodinamica effettivamente realizzabile, cioè realmente praticabile. In effetti, il calore passa sempre in modo *spontaneo* da corpi caldi a corpi freddi. L'aggettivo *spontaneo* determina questa condizione. Se immergiamo una sbarra di ferro arroventata in un recipiente pieno d'acqua fredda avremo come effetto un progressivo raffreddarsi della sbarra e al contempo un riscaldamento altrettanto progressivo dell'acqua. Ma

elementi solidi (benché a rigore la cosa si verifichi anche nei fluidi a causa degli urti tra gli atomi e le molecole), e determina il fenomeno per cui il calore trasmesso dal carbone rovente a un estremo di un'asta di ferro transita lungo la stessa fino all'estremità opposta. La propagazione del calore per *convezione* è inerente alla diffusione del calore nei fluidi, e si compie con uno spostamento di materia, come nel caso dell'acqua contenuta nel bollitore che raggiunge una determinata temperatura mediante il semplice contatto della parte inferiore del contenitore con la fiamma del fornello, e conseguente spostamento dell'acqua nella parte più alta del recipiente medesimo.

La propagazione del calore per *irraggiamento* avviene senza contatto; l'energia termica fluisce sotto forma di onde elettromagnetiche, come accade quando, durante un bivacco all'aperto in alta montagna, ci si scalda intorno a un fuoco, il cui tepore raggiunge il nostro corpo.

5. Due principi

Si è detto che il calore è una forma di energia che può essere trasformata in lavoro e che, per converso, il lavoro meccanico compiuto dall'attrito appare sotto forma di calore o energia termica dei corpi che lo subiscono. La Termodinamica è appunto l'ambito della scienza fisica che ha come oggetto le relazioni tra il calore e il lavoro, relazioni che si fondano su alcuni principi.

Il *primo principio* della Termodinamica, riprendendo quanto già acquisito sul terreno della Meccanica, afferma che l'energia non si crea, ma neppure si distrugge; essa, semplicemente, si trasforma, può cioè passare da una forma all'altra. Il che significa che non può esistere una macchina in grado di compiere un lavoro senza consumare energia.

Per il *secondo principio* della Termodinamica il calore non si trasforma mai interamente in lavoro. Si tratta di una ulteriore, rigorosa condizione cui è sottoposta ogni trasformazione termodinamica effettivamente realizzabile, cioè realmente praticabile. In effetti, il calore passa sempre in modo *spontaneo* da corpi caldi a corpi freddi. L'aggettivo *spontaneo* determina questa condizione. Se immergiamo una sbarra di ferro arroventata in un recipiente pieno d'acqua fredda avremo come effetto un progressivo raffreddarsi della sbarra e al contempo un riscaldamento altrettanto progressivo dell'acqua. Ma

potremo attendere quanto tempo vorremo: l'effetto inverso non si realizzerà mai, cioè non assisteremo al progressivo raffreddarsi dell'acqua e, al contempo, al progressivo surriscaldarsi della sbarra di ferro. Niente vieta, si badi bene, che il calore possa passare da un corpo freddo a un corpo caldo, come avviene nei refrigeratori; solo che questo tipo di passaggio, per essere reale, cioè effettivamente realizzato, richiede un lavoro, ovvero non può avvenire *spontaneamente*. Si stabilisce in questo modo che per ogni trasformazione di energia in un sistema isolato, cioè privo di influenze e perturbazioni esterne, se l'energia totale implicata in un processo è sempre costante, la quantità di energia utile per compiere un lavoro diminuisce, dissipandosi in calore, attrito ecc. La degradazione è appunto il passaggio da una forma di energia a un'altra che non può essere accompagnata dalla trasformazione inversa completa, il che necessita l'introduzione di una nuova quantità o grandezza, l'entropia. Questa grandezza esprime la degradazione di energia che avviene sempre in ogni trasformazione; la sua unità di misura è *Joule/Kelvin (J/K)*. Concretamente ciò ci dice che non esiste una macchina che abbia un'efficienza totale pari a 1, nel senso che non tutta la differenza tra calore sottratto e calore ceduto si trasforma in lavoro.

CHE COS'È L'AMBIENTE

1. Definizione di ambiente

Al semplice udire pronunciare la parola “ambiente” può accadere che ciascuno di noi si trovi a guardarsi attorno, a girare la testa più o meno istintivamente con lo sguardo ben attento a delineare tutto ciò che lo separa dall'orizzonte visivo. “Ambiente” è appunto *ciò che sta attorno*, e ciò che circonda si caratterizza innanzitutto come luogo nel quale, accanto a oggetti o cose inanimate, riscontriamo la presenza di esseri viventi come noi, di animali e di vegetali; in questo luogo, che talvolta indichiamo come il *nostro* ambiente, ci muoviamo, entriamo in relazione, svolgiamo le nostre attività: in una parola, viviamo, grazie anche a particolari condizioni chimiche e fisiche. Dal batterio all'uomo, ciascun individuo ha un suo luogo particolare in cui vive interagendo continuamente con gli altri esseri viventi e con gli elementi fisici della realtà che lo circonda.

Dal punto di vista dell'ecologia, cioè di quella scienza che studia le interazioni tra gli esseri viventi e l'ambiente con uno sguardo particolarmente interessato agli effetti prodotti su quest'ultimo dall'attività umana, l'ambiente naturale è un sistema complesso dove la vita è tale in virtù delle relazioni che vengono a stabilirsi tra i suoi componenti, nessuno escluso. Si definisce così *ecosistema* l'insieme della comunità biologica e dell'ambiente fisico e chimico in cui tale comunità vive.

Nelle diverse zone del nostro pianeta sono distinguibili ecosistemi molto diversi tra loro. Gli *ecosistemi terrestri* sono strettamente legati alle condizioni climatiche e del terreno e ospitano vegetali e animali particolari; ognuno di questi ecosistemi comprende anche le acque dolci che sono presenti sul suo territorio. La tundra è caratterizzata dalla presenza di muschi e di piante tipiche delle zone polari; la taiga, dalle foreste di conifere e dalla notevole varietà di animali che vivono nella zona immediatamente a ridosso dei confi-

ni artici. A queste si aggiungono le foreste della zona temperata e quelle tropicali, come pure la savana; infine i luoghi apparentemente inospitali come i deserti. Gli *ecosistemi acquatici* sono invece determinati da due fattori o condizioni ambientali: la luce e la temperatura. Benché la vita animale sia presente anche a profondità rilevanti, dove si registrano temperature assai basse, quella vegetale non va oltre il limite entro il quale la luce solare può penetrare, cioè la *zona eufotica*. In questo ambito distingueremo gli ecosistemi di acqua dolce e gli ecosistemi marini, nonché gli estuari dei fiumi che creano una zona mista là dove l'acqua salata si miscela con quella dolce.

2. Fattori ambientali e condizioni limitanti

Nel definire la nozione di ambiente, abbiamo rilevato come la componente esterna all'organismo, costituita da particolari elementi chimici e fisici, svolga un ruolo fondamentale per la vita dell'individuo. Questi fattori ambientali, poiché privi di qualsiasi elemento biologico, sono detti *abiotici*. Pur fondamentali per la sopravvivenza, queste condizioni non la determinano interamente, nel senso che la sopravvivenza di ciascun individuo dipende anche dalle interazioni che esso mantiene con gli altri esseri viventi. Per poter vivere, ogni organismo deve tuttavia poter disporre di determinate quantità di taluni fattori; tra questi, ve ne sono addirittura alcuni che possono influenzare in modo decisivo l'attività degli altri, e che, per questo motivo, possono essere ben detti limitanti, perché esprimono la possibilità che un organismo ha di continuare a vivere in caso di loro assenza. Affinché un determinato animale, come l'uomo, sia in grado di vivere, la presenza di ossigeno in quantità stabile e sufficiente nell'atmosfera terrestre, è indispensabile per compiere la respirazione e, di conseguenza, limitante. Ciò non significa che una condizione che può essere limitante per un organismo lo debba essere necessariamente anche per gli altri: la quantità di anidride carbonica (CO_2) non è limitante per la respirazione umana, ma lo è per le piante, giacché quella determinata quantità è loro necessaria per la fotosintesi clorofilliana. Allo stesso modo, può esser data una condizione che, a seconda delle circostanze, può rivelarsi limitante o meno, come nel caso della luce solare che raggiunge la superficie terrestre e consente la vita vegetale, rivelandosi però limitante per le alghe, che appunto possono crescere solo se la luce riesce a penetrare nell'ambiente acquatico.

3. L'ambiente Terra

Se si amplia la nozione di ambiente, ovvero si considera il complesso degli elementi naturali che circonda la vita sul nostro pianeta, potremo individuare tre grandi domini o sfere nei quali tali elementi si ripartiscono. Si tratta dell'*atmosfera*, dell'*idrosfera* e della *litosfera*. Questi domini interagiscono tra loro e con un quarto elemento, la *biosfera*, che comprende tutte le forme di vita. L'ambiente Terra può così essere considerato come un sistema in cui questi quattro elementi si mantengono in equilibrio.

L'*atmosfera* può essere considerata come divisa in quattro livelli:

- la *troposfera*, dal suolo terrestre fino a un'altezza di 12 chilometri, raccoglie il 75% dell'aria del pianeta e le sue impurità ed è il dominio proprio della meteorologia. È qui, in questa fascia, che ha luogo la formazione delle nuvole e delle piogge, delle correnti d'aria calde e fredde, dove insomma avvengono gli scambi di energia tra gli oceani, la superficie terrestre e l'atmosfera;
- la *stratosfera*, dall'altezza di 12 chilometri fino a 50 chilometri, dove ha sede la sottile fascia di ozono che rende possibile una adeguata ed efficace protezione degli esseri viventi dalle dannose radiazioni ultraviolette provenienti dal Sole;
- la *mesosfera*, che si estende da un'altezza di 50 chilometri fino a 80 chilometri, dove si registra una marcata diminuzione della temperatura;
- la *termosfera*, lo strato più alto, che va dagli 80 agli 800-1000 chilometri.

Grazie alle sue componenti, l'atmosfera svolge un ruolo fondamentale per la vita; i suoi costituenti sono: azoto, per circa il 78%; ossigeno, per circa il 21%; argon, per lo 0,93%. La quota rimanente comprende, tra l'altro, l'anidride carbonica, con una percentuale di circa 360 *ppm* (parti per milione). Pur avendo una quota estremamente ridotta, l'anidride carbonica svolge e assolve un ruolo fondamentale che, come vedremo, apparirà in tutta la sua importanza considerando il legame tra l'atmosfera e l'energia che la Terra riceve dallo spazio.

L'*idrosfera* è il dominio dell'acqua (H_2O), il liquido più abbondante del pianeta, presente sotto tre forme o stati di aggregazione: solida, liquida e gassosa. Il 96,5% dell'acqua è custodita dagli oceani e dai mari; circa l'1,7% è concentrato nelle calotte polari e nei ghiacciai, men-

tre l'1,8% è raccolta dai fiumi, dai laghi, nei corsi d'acqua sotterranei, nelle nuvole e nella nebbia. Nel loro insieme, queste forme costituiscono dunque l'idrosfera; a essa sono legati i fenomeni meteorologici che interessano gli esseri viventi: l'acqua degli oceani e dei mari assorbe il calore solare e si trasforma in vapore che, raggiunta l'atmosfera, forma le nuvole e, in condizioni particolari, torna al suolo come pioggia o neve.

La litosfera comprende le rocce che, pur nella loro solidità, sono sottoposte a lenti processi di trasformazione; la sua porzione superficiale subisce l'azione dell'aria e dell'acqua dando luogo alla formazione del suolo, necessario allo sviluppo degli organismi viventi. Il terreno su cui quotidianamente camminiamo non è qualcosa di totalmente inerte: al suo interno, oltre alla materia inorganica trova ospitalità una gran varietà di organismi viventi. La Terra è costituita da diversi strati, ciascuno dei quali presenta materiali differenti. Lo strato più esterno è detto appunto litosfera (sfera di pietra), perché in essa gli elementi chimici naturali sono uniti in vario modo per la formazione di componenti solidi, ossia minerali e rocce. Il suolo, la parte più superficiale della litosfera, deriva dalle interazioni chimiche, fisiche e biologiche tra l'atmosfera, la biosfera e la stessa litosfera. Così, se l'acqua e il vento aggrediscono i materiali del suolo e li trasportano altrove, la vegetazione ha un effetto protettivo nei riguardi di quest'ultimo: le radici delle piante assorbono dal terreno acqua e nutrimento, cioè sali minerali, ma lo rendono consistente opponendosi e limitando l'azione erosiva e di dilavamento dell'acqua corrente, mentre le foglie cadute arricchiscono il terreno di sostanze organiche.

La biosfera può, a buon diritto, essere considerato il dominio che contempla la più alta organizzazione della materia vivente; al suo interno si distinguono unità più piccole, i *biomi*, cioè sistemi caratterizzati da particolari condizioni climatiche e da una specifica vegetazione. La biosfera non è qualcosa di immutabile; al contrario, sin dalla comparsa delle prime forme di vita, il processo dell'evoluzione e le trasformazioni climatiche e geomorfologiche hanno profondamente modificato gli organismi, determinandone la comparsa o l'estinzione, influenzandone le reciproche interrelazioni. Le naturali trasformazioni della biosfera subiscono tuttavia anche le alterazioni provocate dalle attività umane.

CHE COS'È L'AMBIENTE

1. Definizione di ambiente

Al semplice udire pronunciare la parola “ambiente” può accadere che ciascuno di noi si trovi a guardarsi attorno, a girare la testa più o meno istintivamente con lo sguardo ben attento a delineare tutto ciò che lo separa dall'orizzonte visivo. “Ambiente” è appunto *ciò che sta attorno*, e ciò che circonda si caratterizza innanzitutto come luogo nel quale, accanto a oggetti o cose inanimate, riscontriamo la presenza di esseri viventi come noi, di animali e di vegetali; in questo luogo, che talvolta indichiamo come il *nostro* ambiente, ci muoviamo, entriamo in relazione, svolgiamo le nostre attività: in una parola, viviamo, grazie anche a particolari condizioni chimiche e fisiche. Dal batterio all'uomo, ciascun individuo ha un suo luogo particolare in cui vive interagendo continuamente con gli altri esseri viventi e con gli elementi fisici della realtà che lo circonda.

Dal punto di vista dell'ecologia, cioè di quella scienza che studia le interazioni tra gli esseri viventi e l'ambiente con uno sguardo particolarmente interessato agli effetti prodotti su quest'ultimo dall'attività umana, l'ambiente naturale è un sistema complesso dove la vita è tale in virtù delle relazioni che vengono a stabilirsi tra i suoi componenti, nessuno escluso. Si definisce così *ecosistema* l'insieme della comunità biologica e dell'ambiente fisico e chimico in cui tale comunità vive.

Nelle diverse zone del nostro pianeta sono distinguibili ecosistemi molto diversi tra loro. Gli *ecosistemi terrestri* sono strettamente legati alle condizioni climatiche e del terreno e ospitano vegetali e animali particolari; ognuno di questi ecosistemi comprende anche le acque dolci che sono presenti sul suo territorio. La tundra è caratterizzata dalla presenza di muschi e di piante tipiche delle zone polari; la taiga, dalle foreste di conifere e dalla notevole varietà di animali che vivono nella zona immediatamente a ridosso dei confi-

ni artici. A queste si aggiungono le foreste della zona temperata e quelle tropicali, come pure la savana; infine i luoghi apparentemente inospitali come i deserti. Gli *ecosistemi acquatici* sono invece determinati da due fattori o condizioni ambientali: la luce e la temperatura. Benché la vita animale sia presente anche a profondità rilevanti, dove si registrano temperature assai basse, quella vegetale non va oltre il limite entro il quale la luce solare può penetrare, cioè la *zona eufotica*. In questo ambito distingueremo gli ecosistemi di acqua dolce e gli ecosistemi marini, nonché gli estuari dei fiumi che creano una zona mista là dove l'acqua salata si miscela con quella dolce.

2. Fattori ambientali e condizioni limitanti

Nel definire la nozione di ambiente, abbiamo rilevato come la componente esterna all'organismo, costituita da particolari elementi chimici e fisici, svolga un ruolo fondamentale per la vita dell'individuo. Questi fattori ambientali, poiché privi di qualsiasi elemento biologico, sono detti *abiotici*. Pur fondamentali per la sopravvivenza, queste condizioni non la determinano interamente, nel senso che la sopravvivenza di ciascun individuo dipende anche dalle interazioni che esso mantiene con gli altri esseri viventi. Per poter vivere, ogni organismo deve tuttavia poter disporre di determinate quantità di taluni fattori; tra questi, ve ne sono addirittura alcuni che possono influenzare in modo decisivo l'attività degli altri, e che, per questo motivo, possono essere ben detti limitanti, perché esprimono la possibilità che un organismo ha di continuare a vivere in caso di loro assenza. Affinché un determinato animale, come l'uomo, sia in grado di vivere, la presenza di ossigeno in quantità stabile e sufficiente nell'atmosfera terrestre, è indispensabile per compiere la respirazione e, di conseguenza, limitante. Ciò non significa che una condizione che può essere limitante per un organismo lo debba essere necessariamente anche per gli altri: la quantità di anidride carbonica (CO_2) non è limitante per la respirazione umana, ma lo è per le piante, giacché quella determinata quantità è loro necessaria per la fotosintesi clorofilliana. Allo stesso modo, può esser data una condizione che, a seconda delle circostanze, può rivelarsi limitante o meno, come nel caso della luce solare che raggiunge la superficie terrestre e consente la vita vegetale, rivelandosi però limitante per le alghe, che appunto possono crescere solo se la luce riesce a penetrare nell'ambiente acquatico.

ni artici. A queste si aggiungono le foreste della zona temperata e quelle tropicali, come pure la savana; infine i luoghi apparentemente inospitali come i deserti. Gli *ecosistemi acquatici* sono invece determinati da due fattori o condizioni ambientali: la luce e la temperatura. Benché la vita animale sia presente anche a profondità rilevanti, dove si registrano temperature assai basse, quella vegetale non va oltre il limite entro il quale la luce solare può penetrare, cioè la *zona eufotica*. In questo ambito distingueremo gli ecosistemi di acqua dolce e gli ecosistemi marini, nonché gli estuari dei fiumi che creano una zona mista là dove l'acqua salata si miscela con quella dolce.

2. Fattori ambientali e condizioni limitanti

Nel definire la nozione di ambiente, abbiamo rilevato come la componente esterna all'organismo, costituita da particolari elementi chimici e fisici, svolga un ruolo fondamentale per la vita dell'individuo. Questi fattori ambientali, poiché privi di qualsiasi elemento biologico, sono detti *abiotici*. Pur fondamentali per la sopravvivenza, queste condizioni non la determinano interamente, nel senso che la sopravvivenza di ciascun individuo dipende anche dalle interazioni che esso mantiene con gli altri esseri viventi. Per poter vivere, ogni organismo deve tuttavia poter disporre di determinate quantità di taluni fattori; tra questi, ve ne sono addirittura alcuni che possono influenzare in modo decisivo l'attività degli altri, e che, per questo motivo, possono essere ben detti limitanti, perché esprimono la possibilità che un organismo ha di continuare a vivere in caso di loro assenza. Affinché un determinato animale, come l'uomo, sia in grado di vivere, la presenza di ossigeno in quantità stabile e sufficiente nell'atmosfera terrestre, è indispensabile per compiere la respirazione e, di conseguenza, limitante. Ciò non significa che una condizione che può essere limitante per un organismo lo debba essere necessariamente anche per gli altri: la quantità di anidride carbonica (CO_2) non è limitante per la respirazione umana, ma lo è per le piante, giacché quella determinata quantità è loro necessaria per la fotosintesi clorofilliana. Allo stesso modo, può esser data una condizione che, a seconda delle circostanze, può rivelarsi limitante o meno, come nel caso della luce solare che raggiunge la superficie terrestre e consente la vita vegetale, rivelandosi però limitante per le alghe, che appunto possono crescere solo se la luce riesce a penetrare nell'ambiente acquatico.

3. L'ambiente Terra

Se si amplia la nozione di ambiente, ovvero si considera il complesso degli elementi naturali che circonda la vita sul nostro pianeta, potremo individuare tre grandi domini o sfere nei quali tali elementi si ripartiscono. Si tratta dell'*atmosfera*, dell'*idrosfera* e della *litosfera*. Questi domini interagiscono tra loro e con un quarto elemento, la *biosfera*, che comprende tutte le forme di vita. L'ambiente Terra può così essere considerato come un sistema in cui questi quattro elementi si mantengono in equilibrio.

L'*atmosfera* può essere considerata come divisa in quattro livelli:

- la *troposfera*, dal suolo terrestre fino a un'altezza di 12 chilometri, raccoglie il 75% dell'aria del pianeta e le sue impurità ed è il dominio proprio della meteorologia. È qui, in questa fascia, che ha luogo la formazione delle nuvole e delle piogge, delle correnti d'aria calde e fredde, dove insomma avvengono gli scambi di energia tra gli oceani, la superficie terrestre e l'atmosfera;
- la *stratosfera*, dall'altezza di 12 chilometri fino a 50 chilometri, dove ha sede la sottile fascia di ozono che rende possibile una adeguata ed efficace protezione degli esseri viventi dalle dannose radiazioni ultraviolette provenienti dal Sole;
- la *mesosfera*, che si estende da un'altezza di 50 chilometri fino a 80 chilometri, dove si registra una marcata diminuzione della temperatura;
- la *termosfera*, lo strato più alto, che va dagli 80 agli 800-1000 chilometri.

Grazie alle sue componenti, l'atmosfera svolge un ruolo fondamentale per la vita; i suoi costituenti sono: azoto, per circa il 78%; ossigeno, per circa il 21%; argon, per lo 0,93%. La quota rimanente comprende, tra l'altro, l'anidride carbonica, con una percentuale di circa 360 *ppm* (parti per milione). Pur avendo una quota estremamente ridotta, l'anidride carbonica svolge e assolve un ruolo fondamentale che, come vedremo, apparirà in tutta la sua importanza considerando il legame tra l'atmosfera e l'energia che la Terra riceve dallo spazio.

L'*idrosfera* è il dominio dell'acqua (H_2O), il liquido più abbondante del pianeta, presente sotto tre forme o stati di aggregazione: solida, liquida e gassosa. Il 96,5% dell'acqua è custodita dagli oceani e dai mari; circa l'1,7% è concentrato nelle calotte polari e nei ghiacciai, men-

tre l'1,8% è raccolta dai fiumi, dai laghi, nei corsi d'acqua sotterranei, nelle nuvole e nella nebbia. Nel loro insieme, queste forme costituiscono dunque l'idrosfera; a essa sono legati i fenomeni meteorologici che interessano gli esseri viventi: l'acqua degli oceani e dei mari assorbe il calore solare e si trasforma in vapore che, raggiunta l'atmosfera, forma le nuvole e, in condizioni particolari, torna al suolo come pioggia o neve.

La litosfera comprende le rocce che, pur nella loro solidità, sono sottoposte a lenti processi di trasformazione; la sua porzione superficiale subisce l'azione dell'aria e dell'acqua dando luogo alla formazione del suolo, necessario allo sviluppo degli organismi viventi. Il terreno su cui quotidianamente camminiamo non è qualcosa di totalmente inerte: al suo interno, oltre alla materia inorganica trova ospitalità una gran varietà di organismi viventi. La Terra è costituita da diversi strati, ciascuno dei quali presenta materiali differenti. Lo strato più esterno è detto appunto litosfera (sfera di pietra), perché in essa gli elementi chimici naturali sono uniti in vario modo per la formazione di componenti solidi, ossia minerali e rocce. Il suolo, la parte più superficiale della litosfera, deriva dalle interazioni chimiche, fisiche e biologiche tra l'atmosfera, la biosfera e la stessa litosfera. Così, se l'acqua e il vento aggrediscono i materiali del suolo e li trasportano altrove, la vegetazione ha un effetto protettivo nei riguardi di quest'ultimo: le radici delle piante assorbono dal terreno acqua e nutrimento, cioè sali minerali, ma lo rendono consistente opponendosi e limitando l'azione erosiva e di dilavamento dell'acqua corrente, mentre le foglie cadute arricchiscono il terreno di sostanze organiche.

La biosfera può, a buon diritto, essere considerato il dominio che contempla la più alta organizzazione della materia vivente; al suo interno si distinguono unità più piccole, i *biomi*, cioè sistemi caratterizzati da particolari condizioni climatiche e da una specifica vegetazione. La biosfera non è qualcosa di immutabile; al contrario, sin dalla comparsa delle prime forme di vita, il processo dell'evoluzione e le trasformazioni climatiche e geomorfologiche hanno profondamente modificato gli organismi, determinandone la comparsa o l'estinzione, influenzandone le reciproche interrelazioni. Le naturali trasformazioni della biosfera subiscono tuttavia anche le alterazioni provocate dalle attività umane.

LE FONTI DI ENERGIA

1. Energia primaria e secondaria

Per il primo principio della Termodinamica, l'energia si conserva per definizione, sicché non si vede proprio perché dovremmo sforzarci di conservarla e risparmiarla. Il fatto che l'energia si conservi non implica tuttavia che la sua fruizione sia immediata o priva di uno sforzo non indifferente per averla a portata di mano. Sappiamo anzi, in virtù del secondo principio della Termodinamica, che essa sfugge continuamente alle nostre prese e, soprattutto, si degrada, cioè diminuisce la sua capacità di produrre lavoro, proprio ciò che più conta. Così, per rendere confortevole la nostra abitazione nei periodi in cui ci troviamo sottoposti ai rigori del freddo, che l'energia non si crei né si distrugga c'interessa poco: ciò che invece ci preme è che il calore erogato dai nostri radiatori disposti in particolari zone della nostra abitazione disperda all'esterno la minima quantità possibile di calore prodotto per riscaldarci. Ciò di cui abbiamo bisogno non è dunque, anzitutto, dell'energia generica, ma di risorse di energia suscettibili di essere adeguatamente trasformate nelle forme e nei modi che ci sono maggiormente utili e vantaggiosi, benché necessariamente sottoposti ai principi e alle leggi che governano l'intero universo.

Le materie prime, ma anche i fenomeni naturali che possono essere utilizzati per produrre energia, e dunque classificabili come risorse energetiche, vengono ordinariamente indicate come *energia primaria* proprio perché, a partire da esse e attraverso opportune trasformazioni, si ottiene la loro conversione in *energia secondaria*, quella pronta per essere "a portata di mano", che in definitiva ci consente di creare sviluppo economico e progresso sociale. Con riferimento alla natura stessa delle risorse in oggetto, ovvero il fatto di essere materie prime o fenomeni naturali, le distingueremo in *risorse energetiche rinnovabili* e *risorse energetiche non rinnovabili*.

La conversione da energia primaria a energia secondaria non è

cosa da poco; richiede conoscenze tecniche complesse e la costruzione di impianti adeguati come raffinerie per il petrolio greggio, centrali termoelettriche a carbone o a gas, centrali nucleari, pannelli solari o cellule fotovoltaiche, che ci permettono di produrre elettricità, benzina, gasolio, carbone da legna ecc. Non solo: l'energia secondaria deve poi essere distribuita e applicata, cioè diventare disponibile come servizio e dunque trasformarsi in energia effettivamente utile per azionare ad esempio una lavatrice, far muovere un'automobile, tenendo conto che in ogni momento dell'intero processo, dalla conversione all'utilizzazione, dobbiamo riscontrare ingenti perdite di energia: basti pensare che l'efficienza di utilizzo dell'energia primaria si attesta ancora sotto il 10%.

2. Le risorse energetiche rinnovabili

Si tratta di tutte quelle fonti la cui disponibilità costante in natura è garantita da un continuo e incessante reintegro per l'azione dei fenomeni naturali, che si produce in un arco temporale estremamente breve. A questa categoria appartengono l'energia solare, geotermica, eolica, idraulica, oceanica e mareomotrice; infine, l'energia prodotta da biomassa e da rifiuti solidi urbani.

a) L'energia solare

L'energia solare comprende, direttamente o indirettamente, la quasi totalità dell'energia disponibile – tanto quella derivante dal progressivo accumularsi di materiale, come nel caso della formazione del carbone, del petrolio e del metano, combustibili fossili – quanto quella proveniente da un processo chimico, come la fotosintesi terrestre e oceanica, nonché il moto dei venti e delle acque. Basti pensare che la radiazione che colpisce annualmente il nostro pianeta equivale a circa 15.000 volte l'attuale consumo mondiale di energia: si tratta, dunque, di una quantità enorme. Solo che la potenza captata dalla Terra non è interamente raccolta al suolo, e anche la quota che vi giunge subisce notevoli e inesorabili decurtamenti: se il 30% viene riflesso nello spazio e il 50% è assorbito e nuovamente irradiato, il restante 20% è responsabile del ciclo dell'acqua; solo una percentuale estremamente bassa dell'irraggiamento solare al suolo consente di fatto la vita. Non sorprenderà, così, che la media della radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre sia solo di $143,3 \text{ W/m}^2$, dal momento che essa viene a dipendere da nume-

rose condizioni, quali le stagioni, la latitudine, l'altitudine, le condizioni atmosferiche. Questa discontinuità rende la gestione dell'energia solare sia sotto forma di utilizzazione del calore (pannelli solari) sia della produzione di elettricità (celle fotovoltaiche), non ancora competitiva, benché notevoli passi in avanti siano stati fatti, tanto che, in determinate zone lontane dalle reti di alimentazione ordinaria, le celle solari costituiscono già da ora una strada economicamente percorribile.

b) L'energia geotermica

L'energia geotermica consiste nel calore generato all'interno della crosta terrestre, proveniente dal centro della Terra. È un tipo di energia che può essere debitamente recuperata sfruttando l'acqua calda o il vapore degli strati sotterranei delle zone vulcaniche, e che fuoriesce spontaneamente. Dato che scaturisce dal sottosuolo come vapore o calore, l'energia geotermica gode dell'indubbio vantaggio di evitare le spese di costruzione dei generatori di vapore, anche se denota un alto grado di impurità, oltre a pressioni e temperature non elevate. Si tratta di un inconveniente di non poco conto, giacché implica la costruzione di grandi turbine e condensatori e, a causa del gas e dei composti chimici presenti tanto nel vapore quanto nelle acque, come il radon (Rn), l'anidride carbonica (CO₂), l'anidride solforosa (SO₂), il boro (B), l'arsenico (A), l'ammoniaca (NH₃) e l'acido solfidrico (H₂S), comporta l'utilizzo di materiali particolarmente pregiati e costosi. È comunque indubbio che in presenza di anomalie termiche rilevanti nella crosta terrestre, la geotermia deve essere considerata, seppur necessariamente a livello locale (ad esempio Larderello in Toscana) o regionale (ad esempio Islanda, Nuova Zelanda, California settentrionale), una risorsa preziosa di energia termica e, come tale, adeguatamente utilizzata.

c) L'energia eolica

L'energia eolica deriva direttamente dal fenomeno ventoso, uno dei mezzi più antichi per produrre energia meccanica, ma anche il più complesso in virtù della natura irregolare o variabile del vento. La sua imprevedibilità nel tempo e nello spazio, cioè da momento a momento e da luogo a luogo, non è l'unico serio ostacolo per una sua proficua ed efficiente utilizzazione. La variabilità di questa fonte energetica copre infatti anche una vasta gamma di velocità, e l'effetto velocità è reso ancor più acuto dal fatto che l'entità della spin-

ta varia con il quadrato della velocità, mentre il lavoro compiuto nell'unità di tempo varia con il cubo della velocità. Ciò significa che data una raffica di vento otto volte maggiore della velocità media dello stesso – e la cosa può ben verificarsi in condizioni di tempesta – la forza del vento diviene ben 64 volte il valore della spinta normale, il che pone notevoli problemi tecnici nella costruzione della macchina eolica, denominata aerogeneratore allorché disposta alla produzione di elettricità. Il livello di competitività del motore eolico, con la sua caratteristica elica, non è ancora elevato ma, alla lunga, specie per impianti disposti in mare, è destinato ad aumentare, in particolare per l'apporto di Paesi come la Danimarca che, per condizioni ambientali particolarmente favorevoli e tradizioni culturali, ha investito notevolmente su questa risorsa energetica.

d) L'energia idraulica

L'energia idraulica è dovuta alla caduta di notevoli masse di acqua, o al suo fluire, ed è anch'essa fortemente condizionata da precise disponibilità idriche e, dunque, da un contesto geografico, meteorologico e geologico, nel senso che l'utilizzo di una simile risorsa richiede la presenza di bacini montani e fluviali tali da poter essere vantaggiosamente sfruttati. L'impatto sull'ambiente, e i costi per la creazione di sbarramenti e invasi, è assai elevato e può talvolta alterare in misura non marginale l'equilibrio dell'area interessata. Dato che il funzionamento di un impianto che sfrutta l'energia dell'acqua per generare elettricità è conveniente in regime di continuità, fattori quali il tempo, la portata e le sue variazioni, la circostanza rispetto alla richiesta dell'utenza, sono qualitativamente molto rilevanti in merito alla scelta di questa fonte energetica.

e) L'energia oceanica

L'energia oceanica trae la propria caratteristica specifica dall'enorme quantità di calore che quotidianamente le acque degli oceani assorbono dal Sole. Sfruttare questa risorsa significa utilizzare la differenza di temperatura esistente tra le acque calde superficiali e quelle fredde dei fondali oceanici. Tecnicamente è stato messo a punto un metodo, ancora in via sperimentale, denominato Otec (*Ocean Thermal Energy Conversion*). Il calore delle acque superficiali viene trasferito a un fluido intermedio a basso punto di ebollizione che, a sua volta, mette in azione una turbina per la produzione dell'elettricità. Le acque fredde servono ad alimentare un condensatore nel

quale viene incanalato il vapore. Le prove compiute consentono di coltivare interessanti aspettative di successo sebbene gli ostacoli siano ancora numerosi e per certi aspetti decisivi, visto che sono relativi alla scelta dei materiali più idonei per la costruzione dei condotti dell'acqua fredda e delle loro dimensioni.

f) L'energia mareomotrice

L'energia mareomotrice proviene dal moto alternativo delle masse di acqua, le onde e le maree. Le onde sono dovute indirettamente all'irraggiamento solare. Per essere adeguatamente sfruttato, il fenomeno ondoso, con le sue oscillazioni di massa, deve essere necessariamente gestito attraverso un sistema di accumulo energetico regolarizzato. Occorre tuttavia tener presente che lo stesso fenomeno ha caratteristiche specifiche che variano in relazione alle diverse circostanze geografiche e climatiche: sono favorevoli le condizioni in cui si è in presenza di onde frequenti e regolari, con altezza adeguata. Il problema principale per la gestione di questa disponibilità energetica sta nel predisporre un'utenza che possa operare nello stesso tempo e nello stesso luogo con il sistema che produce energia trasformata in elettricità. Detto in altri termini, là dove si è in presenza di un fenomeno ondoso con le caratteristiche richieste, converrà installare nelle immediate vicinanze del relativo impianto di elaborazione energetica, cioè di generazione di elettricità, un'utenza elettrica di pari potenza, ad esempio un impianto di dissalazione per la produzione di acqua dolce.

Ancor più significativo, sia per le masse d'acqua coinvolte sia per la possibilità di realizzare efficaci sistemi di accumulo, è lo sfruttamento delle onde di marea, fenomeno dovuto all'energia gravitazionale della Luna e del Sole, soprattutto dove l'altezza della marea è rilevante. La regolare periodicità del fenomeno, la possibilità di usare quali bacini di accumulo la morfologia di certe coste, come le foci fluviali e le aree non produttive di territorio, permette di realizzare impianti idroelettrici ad acqua fluente. Non vanno tuttavia sottovalutate le opere accessorie quali dighe e sbarramenti, che presentano costi elevati sul piano economico e, talvolta, ambientale. Un esempio di sfruttamento dell'energia delle maree ci è offerto dall'impianto che da oltre tre decenni opera in Francia sulle coste della Bretagna; grazie a una lunga diga si utilizza il moto dell'acqua sia quando la marea si innalza sia quando rifluisce. In questo modo, senza interruzioni, vengono messe in rotazione una serie

di turbine opportunamente collegate ad alternatori per produrre energia elettrica.

g) L'energia da biomassa

L'energia da biomassa deriva dalla materia vegetale, ed è anch'essa un prodotto dell'attività svolta dal Sole, a partire dalla legna da ardere. Si tratta di una risorsa energetica che presenta un'alta flessibilità, dal momento che può essere bruciata direttamente per produrre elettricità, oppure convertibile in combustibili liquidi e gassosi. I materiali di partenza sono in genere prodotti agricoli o loro derivati, in particolare la canna da zucchero e il mais che, sottoposti a fermentazione, danno luogo alla produzione di alcoli come l'etanolo o il metanolo. Mediante un processo di gassificazione con temperature che vanno dai 700 °C ai 900 °C si ottiene invece una miscela gassosa di idrogeno e monossido di carbonio con calore di combustione basso, ma sufficiente per generare vapore ed elettricità.

Un aspetto del tutto particolare è quello che riguarda la produzione di miscele aeriformi attraverso la fermentazione di rifiuti biologici, in specie i residui di animali in complessi agricoli e di allevamento. Queste miscele, denominate *biogas* possono essere gestite come il gas naturale; ciò che le differenzia da quest'ultimo sono le quantità di prodotto, ovviamente limitate, e il minor contenuto calorico e di pressione, cosa che determina la necessità di ridurre i consumi energetici per il trasporto predisponendo le strutture di consumo il più vicino possibile alla stessa unità produttiva.

b) L'energia da rifiuti solidi urbani

L'energia da rifiuti solidi urbani è prodotta da tutto ciò che si considera materiale di scarto proveniente da abitazioni, uffici ecc. Comprende residui alimentari, arredamento, e, soprattutto, materiale da imballaggio. L'idea che questo tipo di rifiuti possa essere considerato una vera e propria risorsa anche sul piano energetico (teleriscaldamento per usi civili o calore per usi tecnologici impiegato da utenze ubicate nelle immediate vicinanze) raccoglie un sempre più vasto consenso. L'utilizzo energetico del rifiuto solido, una delle fasi del recupero delle materie prime e del loro riciclaggio, consente poi un'efficace gestione del problema igienico e sanitario contribuendo alla riduzione del volume delle quantità di rifiuti da smaltire.

3. Le risorse energetiche non rinnovabili

Si tratta di tutte quelle fonti la cui presenza è esclusivamente dovuta all'evoluzione della Terra dal punto di vista geologico, biologico, e alla sua origine, sul piano termodinamico, il cui eventuale reintegro a seguito del loro sfruttamento prevede un decorso temporale di milioni di anni. Di questa categoria fanno parte i combustibili *fossili* solidi, liquidi e gassosi, nonché quelli *fissili*, come l'uranio.

a) *Combustibili fossili solidi*

I combustibili fossili solidi sono costituiti da resti di piante che si sono modificate dopo un processo durato milioni di anni, dando luogo a un materiale energetico che presenta caratteristiche chimiche che possono variare notevolmente e di diversa efficienza, cioè torba, lignite, litantrace, antracite, a seconda della percentuale di carbonio e del potere calorico, in ordine cronologico di formazione. La lignite, ad esempio, contiene un'alta percentuale di acqua e di sostanze volatili che la porta rapidamente alla decomposizione una volta a contatto con l'aria. La torba, prima fase di formazione di ciò che diverrà carbone in seguito alla completa eliminazione del contenuto di acqua residua grazie a temperatura e pressione sufficienti, è un materiale compatto con alto contenuto di carbonio. In genere, la lignite e la torba contengono circa un terzo dell'energia prodotta dal carbone fossile vero e proprio, cioè litantrace e antracite. Sul piano storico, il carbone può essere considerato il combustibile fossile più importante fino alla seconda metà del XX secolo, quando ha dovuto cedere il passo al petrolio e, attualmente, al gas naturale.

Il *combustibile fossile liquido* per eccellenza è il petrolio greggio, una miscela di idrocarburi facilmente estraibile con la perforazione del suolo, che si è formato principalmente, come del resto il gas naturale, dal plancton depositato nei bassi fondali marini tra i 2 e i 140 milioni di anni fa. Il petrolio è alla base dei consumi energetici per generazione di calore a bassa e media temperatura, quindi energia meccanica, e di consumi per la produzione di numerose materie prime di sintesi.

Il petrolio non è disponibile solo come greggio; si stima che gran parte delle riserve petrolifere che rimangono siano sotto forma di bitume, una sostanza simile al catrame, che impregna talune sabbie e certe particolari rocce denominate scisti. La sua estrazione, che ovviamente comporta l'apertura di miniere a cielo aperto, è dunque assai meno agevole rispetto alla semplice perforazione del sot-

tosuolo; tuttavia, l'entità davvero enorme della risorsa giustifica eventuali costi aggiuntivi. Del resto, basti pensare che utilizzando gli attuali metodi di produzione, dunque trascurando l'innovazione tecnologica che, in questo settore, è quasi quotidiana, dalle sabbie bituminose presenti nel solo Stato di Alberta, in Canada, si ritiene di poter recuperare qualcosa come circa 300 miliardi di barili di petrolio: una quota addirittura superiore alle riserve di greggio dell'Arabia Saudita (il barile è l'unità di misura internazionalmente riconosciuta per il greggio, ed equivale a 138,8 chilogrammi). Sebbene in quantità inferiore, gli scisti bituminosi, rocce metamorfiche che derivano da rocce precedenti sottoposte a forti aumenti di temperatura o pressione, apportano anch'essi un contributo non certo trascurabile: si calcola che l'Austria ne disponga per un equivalente di 28 miliardi di barili di greggio, ma altri depositi sono presenti in Estonia, Brasile, Svezia, Stati Uniti e Cina. Considerati nel loro insieme, i depositi di sabbie e di scisti potrebbero dunque contenere una quota estremamente rilevante di barili di petrolio.

I *combustibili fossili gassosi* sono miscele aeriformi, in genere indicate come gas naturale, con una componente maggioritaria di metano. Come il petrolio, il gas naturale viene estratto dai giacimenti sotterranei e, in genere, è associato proprio ai giacimenti di greggio, tanto che è possibile stabilire un rapporto statistico tra il gas naturale presente quando viene recuperato un metro cubo di petrolio, cioè 105 m³. Il consumo del gas naturale consiste essenzialmente nella generazione di calore negli impianti di riscaldamento domestico, ma viene utilizzato anche come carburante per il trasporto, in impianti termoelettrici e, come sostituto del petrolio, per la produzione petrolchimica.

I combustibili fossili sono diversamente ripartiti e il loro reperimento è dunque diverso; il petrolio greggio e il gas naturale sono quasi sempre associati, ma la loro distribuzione non è uniforme rispetto a quella del carbone: si va dai membri dell'*Organization of Petroleum Exporting Countries* (Opec), sostanzialmente i Paesi del Golfo Persico (Arabia Saudita, Iran, Emirati Arabi, Iraq, Kuwait) e i loro associati (Algeria, Indonesia, Libia e Nigeria) cui va aggiunto il Venezuela, ai giacimenti posseduti dagli Stati Uniti, dal Messico, dalla Russia, dal Regno Unito, dalla Norvegia e dalla Cina. È infine doveroso osservare che i combustibili fossili non hanno lo stesso valore energetico: 1 chilogrammo (e non un litro) di petrolio greggio produce per combustione 10.000 *chilocalorie* (kcal), la stessa quan-

tità di carbone ne sviluppa 7000, mentre dal gas naturale se ne ottengono 8000. Per rendere agevole il confronto tra le diverse risorse energetiche si è stabilita, per convenzione, l'unità di misura *tonnellata equivalente di petrolio (tep)*: una tonnellata di petrolio (7,2 barili) equivale a 1,5 tonnellate di carbone o a 1000 metri cubi di gas naturale. Una *tep* equivale alla produzione di circa 4500 kWh di energia elettrica.

b) I combustibili fissili

I combustibili fissili hanno origine dalla formazione stessa del nostro universo, dagli stati attraversati dalla materia e dall'energia dai quali è stata accompagnata, cioè in seguito alla contrazione e successiva esplosione di stelle di grande massa, le supernove, le cui condizioni estreme di temperatura e pressione hanno dato luogo alla sintesi di elementi pesanti.

Ogni atomo, come è noto, consta di neutroni, particelle prive di carica elettrica, di protoni, particelle con carica elettrica positiva, infine di elettroni, particelle con carica elettrica uguale a quella dei protoni ma di segno negativo. Proprio perché il numero dei protoni, positivi, e degli elettroni, negativi, è il medesimo, l'atomo risulta neutro dal punto di vista elettrico. I protoni e i neutroni sono confinati nel nucleo atomico e mantenuti in questa condizione da forze nucleari.

I nuclei della maggior parte degli elementi naturali sono detti *stabili*, perché restano inalterati nel tempo; altri nuclei sono invece *instabili*, dal momento che si frantumano in un tempo brevissimo, circa un milionesimo di miliardesimo di secondo o in tempi relativamente lunghi, da qualche secondo a diverse centinaia di anni, e che presentano una certa debole radioattività. Se adeguatamente stimolati, ad esempio se urtati violentemente da un neutrone, questi nuclei tendono a rompersi, a spezzarsi immediatamente; per questo motivo gli elementi presenti nel sistema periodico i cui nuclei atomici mostrano questa caratteristica sono chiamati *fissili*.

In natura esiste un solo elemento fissile: l'uranio. È appunto questo elemento che, primariamente, costituisce la fonte energetica necessaria per la produzione di energia nucleare. Il nucleo dell'uranio ha 92 protoni (il suo numero atomico) mentre il numero dei neutroni, superiore a quello dei protoni, presenta, tra le altre, due varianti particolarmente importanti, entrambe con 92 protoni, ma l'una con 143 neutroni, l'altra con 146 neutroni. Gli atomi di uno stesso ele-

mento che presentano un numero diverso di neutroni sono detti *isotopi* di quell'elemento, in questo caso dell'uranio. Con il passare del tempo, gli isotopi tendono a diventare stabili acquisendo o cedendo neutroni. Ora, poiché la somma della massa dei protoni e dei neutroni costituisce la massa del nucleo atomico, la massa dei due isotopi dell'uranio considerati è, rispettivamente, 235 e 238. Possiamo così affermare che l'uranio naturale è composto, per circa lo 0,71% di ${}_{92}^{235}\text{U}$ fissile, di seguito indicato come consuetudine, per motivi di comodità, U-235, e, per circa il 99,29%, di ${}_{92}^{238}\text{U}$, per gli stessi motivi indicato U-238.

Se concentriamo in un piccolo volume una cospicua quantità di materiale fissile, c'è la possibilità che alcuni neutroni prodotti nelle poche fissioni naturali vadano a colpire altri nuclei spezzandoli e provocando altre fissioni. L'energia totale dei due nuclei residui, più leggeri, risultato della frammentazione del nucleo originario, risulta minore rispetto a quella di partenza perché l'energia disponibile viene immediatamente liberata.

Dal momento in cui un neutrone nasce attraverso la fissione, al momento in cui muore provocando una nuova fissione, passano circa venti milionesimi di secondo (2×10^{-5}): questa è la vita di un neutrone. In una reazione ordinaria, con il livello di potenza erogata dalla fissione costante, a una generazione di circa due milioni di miliardi di neutroni (2×10^{15}) pronti per provocare la fissione, dopo 2×10^{-5} secondi ne sorgono altrettanti, e così di seguito. Naturalmente, molti di questi neutroni sono in eccesso: in gran parte, vengono assorbiti dagli elementi della struttura nella quale avviene il processo e dallo stesso U-235, senza provocare fissioni; una quota di neutroni viene infine assorbita da U-238, che non è fissile. Si tratta di una percentuale degna della più interessata attenzione perché il destino che accompagna questi neutroni ha esiti di grande rilievo.

In effetti, la cattura da parte di U-238 di un neutrone dà luogo a un nuovo elemento. Questo elemento è U-239, instabile, con una vita media di ventitré minuti, caratterizzato dall'emissione spontanea di un elettrone, detta emissione $-\beta$. La corsa del nostro neutrone tuttavia non si arresta, perché proprio l'emissione spontanea consente la costituzione di un nuovo elemento: il nettunio, ${}_{93}^{239}\text{Np}$ o Np-239, instabile, con vita media di 2,3 giorni. L'emissione spontanea da parte del nettunio di un ulteriore elettrone produce infine un nuovo elemento non presente in natura: il plutonio, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ o Pu-239, instabile, con vita media di circa 24.000 anni.

Dunque, con la cattura di un neutrone la massa è aumentata da 238 a 239; l'emissione dal nucleo di un elettrone ha fatto salire a 93 il numero dei protoni, mentre il numero dei neutroni che era 147, cioè U-238 più un neutrone catturato, è sceso a 146. La stessa cosa avviene con il nettunio: una nuova emissione di un elettrone porta a 94 il numero atomico e fa scendere a 145 il numero dei neutroni, dando vita al plutonio, $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Il plutonio evidenzia caratteristiche nucleari molto simili a quelle di U-235, il combustibile vero e proprio; è fissile, e rappresenta il costituente principale delle armi nucleari. Originato da U-238, che per questo motivo è chiamato elemento *fertile*, compensa in parte il consumo di U-235 e, come vedremo, in certi casi addirittura lo supera. Ciò che produce energia non è, perciò, solo U-235, ma anche U-238, che in natura è circa 140 volte più abbondante del primo. Questo dato è particolarmente importante, dal momento che la percentuale di materiale fissile è, come si è avuto modo di precisare, inferiore all'1%, il che significa bassa probabilità di dar luogo a un processo di fissione in seguito a bombardamento di neutroni. A questo inconveniente si è ovviato utilizzando uranio naturale arricchito, generalmente con ossido di uranio al 3% di U-235.

Fino alla metà degli anni Ottanta, e ancora oggi nella maggioranza dei casi, per ogni nucleo di U-235 bruciato si producono 0,6 nuclei di Pu-239. Non si raggiunge perciò la parità: tanto uranio bruciato, tanto plutonio prodotto. Ciò è dovuto soprattutto al fatto che i neutroni vengono opportunamente rallentati attraverso una serie di collisioni con una sostanza chiamata, per l'appunto, *moderatore*. Infatti, affinché la probabilità che i neutroni si scontrino con i nuclei di U-235 sia massima, cioè tale da poter permettere l'autonomo e continuo sostentamento delle reazioni, e la probabilità che U-238 catturi gli stessi neutroni sia minima, l'energia posseduta dai neutroni deve essere all'incirca quella di agitazione termica. Per questo motivo, prima che i neutroni urtino i nuclei di uranio si opera in modo da decelerare di almeno cento volte la loro corsa, facendoli scontrare con le molecole di una sostanza che, per peso molecolare e densità, è in grado di rallentarli. A seconda dei casi, il *moderatore* può essere costituito da acqua naturale, da deuterio o da grafite. Attualmente disponiamo tuttavia di tecnologie idonee che riescono a produrre una quantità di plutonio maggiore rispetto alla quantità di U-235 consumata, dando vita così a un processo autofertilizzante.

La reazione dell'uranio mette in evidenza due caratteristiche proprie di ogni processo di fissione nucleare: in primo luogo, la quantità di energia prodotta da ogni singola fissione è molto grande. Se un grammo di petrolio ha un potere calorico di 10 kcal, il rapporto fra il potere calorico di un combustibile fissile come U-235 e quello del petrolio greggio è pari a circa 2 milioni; in secondo luogo, il processo di fissione innescato dall'assorbimento di un neutrone dal primo nucleo di U-235 continua autonomamente; i neutroni emessi in ogni fissione possono a loro volta indurla in altrettanti nuclei di U-235, ciascuno dei quali si spezza in due frammenti con produzione di neutroni e sviluppo di energia. Ha così luogo una reazione a catena che si autoalimenta garantendo una produzione continua di energia nucleare commutabile in elettricità.

Un'ulteriore riserva di combustibile nucleare è data dal torio (Th), un elemento naturale costituito da una sola variante o isotopo funzionale alla sua utilizzazione in questo contesto, cioè $^{232}_{90}\text{Th}$. L'abbondanza del torio è circa tripla rispetto alle riserve di uranio e la sua localizzazione coincide quasi sempre con quella di quest'ultimo.

L'idea di sfruttare il torio come combustibile per la produzione di energia nucleare risale alla fase iniziale dell'utilizzo di questa tecnologia, cioè a partire dal 1950, ed era motivata proprio dalla sua relativa abbondanza. Gli atomi di Th-232 non sono però facilmente scindibili; in compenso, catturano e assorbono assai facilmente neutroni, il che li trasforma in un isotopo dell'uranio, precisamente U-233, in grado di sostenere reazioni di fissione proprio come U-235. Ed è per questo che il Th-232 è considerato *fertile*, proprio come U-238. Attualmente, il flusso di neutroni necessario per il processo, cioè per giungere a U-233, avviene ricorrendo all'uranio arricchito, al plutonio o a entrambi.

L'utilizzazione del torio, o meglio del biossido di torio, come combustibile nucleare presenta indubbi vantaggi rispetto all'uranio. Anzitutto, la generazione di U-233 a partire da Th-232 è assai più efficiente rispetto a quella del plutonio a partire da U-238, in quanto dà luogo a una significativa riduzione di materiale non fissile che viene a crearsi nel corso del processo, ovvero meno scorie da smaltire, e, soprattutto, abbassa sensibilmente la percentuale di plutonio comunque presente nel materiale esausto. In secondo luogo, il biossido di torio (ThO_2) è più stabile del biossido di uranio (UO_2) e ha un punto di fusione almeno 500 volte maggiore, il che garantisce ulteriori margini di sicurezza. Infine, il biossido di

torio presenta una maggiore conducibilità termica rispetto al biossido di uranio.

La fissione non è l'unico modo possibile per liberare energia nucleare; a questo risultato è possibile giungere anche attraverso la fusione di nuclei più leggeri, come l'idrogeno, in nuclei più pesanti. Le stelle, in genere, sono composte in larghissima percentuale di idrogeno e di elio: condizioni al limite di temperatura e di pressione consentono di comprimere i nuclei e raggiungere la fusione.

La produzione controllata di energia nucleare da fusione non ha ancora oggi una veste sperimentale benché, in linea teorica, la sua possibilità, tanto in forma autofertilizzante quanto in quella non autofertilizzante, sia ampiamente dimostrata.

La reazione nucleare che si intende concretamente realizzare è la fusione del deuterio (D), un isotopo stabile e non reattivo che pesa il doppio dell'idrogeno (H), con il trizio (T), anch'esso un isotopo dell'idrogeno, radioattivo, tre volte più pesante di quest'ultimo, ottenendo elio (He) e un neutrone. L'energia liberata dalla fusione consiste nell'energia cinetica dei prodotti della reazione, cioè l'elio e il neutrone, ed è circa 4,2 volte maggiore, a parità di massa, di quella ottenuta attraverso la reazione di fissione. Per intenderci: l'energia da fusione nucleare è ben 8,4 milioni di volte quella liberata dal petrolio greggio.

Il deuterio è disponibile in quantità praticamente illimitata, basti pensare all'entità di idrogeno presente nell'acqua del mare, e a costi praticamente irrisori. Lo stesso, purtroppo, non si può dire del trizio, sostanzialmente introvabile, ma reperibile attraverso il litio (Li), un metallo alcalino. Il litio è un elemento leggero che presenta in natura due isotopi particolarmente interessanti: Li-6 rappresenta il 7,5% del litio naturale, e ha una elevata capacità di catturare neutroni; Li-7, che costituisce circa il 92,5% del litio naturale, con media capacità di catturare neutroni. I due isotopi del litio danno luogo a due diverse reazioni: la prima, con Li-6, avviene a temperatura costante e dà come risultato trizio ed elio; dalla seconda reazione, che invece avviene con assorbimento di calore, si ottengono trizio, elio e un neutrone. In questo modo, uno dei prodotti della reazione, il neutrone, attraverso la fertilizzazione del litio ci procura il trizio sufficiente per alimentare il processo di base. La quantità di litio rintracciabile in natura è pressoché pari a quella di U-238.

L'innesco controllato della miscela di deuterio e trizio non è stato ancora raggiunto a causa delle difficoltà tecniche da superare allor-

ché si deve avere a che fare con temperature dell'ordine dei 100 milioni di gradi e con densità elevatissime. È stata invece verificata sul versante bellico la fusione non controllata con la messa a punto degli armamenti termonucleari, la cosiddetta bomba H.

Alla continua rigenerazione del trizio, indispensabile per la reazione con il deuterio, si è tentato di ovviare ipotizzando altri tipi di reazione di fusione, non più autofertilizzanti. Il modello, in questo caso, è la reazione tra deuterio e deuterio che nel 50% dei casi dà come risultato il trizio e l'idrogeno e nell'altro 50% elio e neutrone.

Il potere calorico, in questa forma, è sostanzialmente uguale a quello ottenuto per fissione.

4. L'idrogeno

L'attenzione richiamata negli ultimi anni nei confronti di questo gas è giustificata dal fatto che le sue ampie e polivalenti caratteristiche lo rendono particolarmente preferibile per coprire quei settori dove l'utilizzo dell'elettricità è meno agevole; là dove, in buona sostanza, non si devono offrire grandi quantità di energia, come nel caso del calore di origine nucleare. Peraltro, la diffusione dell'idrogeno può esser facilitata dall'uso ormai sufficientemente consolidato del gas naturale, i cui sistemi di trasporto possono agevolmente essere sfruttati, fatte salve alcune precauzioni riguardanti i sistemi di controllo e di sicurezza.

A rigore, tuttavia, l'idrogeno *non* è una risorsa energetica ma una *forma di energia* risultante da altre sorgenti e, come tale, del tutto particolare. L'idrogeno è spesso prodotto, utilizzando il calore, tanto dal metano quanto dal carbone, ma è più che evidente che, in prospettiva, il suo sfruttamento a partire da questi processi ne renderebbe vana l'utilità, visto che metano e carbone sono risorse energetiche rilevanti. Un metodo molto più vantaggioso consiste nel processo di scomposizione dell'acqua, un bene prezioso che certo deve essere salvaguardato ma indiscutibilmente di facile accesso, secondo due procedimenti tecnologicamente già acquisiti: elettrolitico e termochimico. Il processo elettrolitico, che consiste nello scindere gli atomi di idrogeno e di ossigeno dell'acqua attraverso l'elettricità, è largamente sperimentato, benché i costi restino elevati per l'incidenza dovuta all'energia elettrica che, ovviamente, deve essere ottenuta attraverso altri e diversi procedimenti. Il sistema termo-

chimico – sostanzialmente un ciclo chiuso di reazioni chimiche a diverse temperature – è assai promettente, perché possono essere scelte temperature compatibili con gli attuali standard tecnologici, senza contare che il flusso termico che entra in gioco nel processo può essere reperito anche attraverso l'energia solare.

Un nuovo, notevole impulso verso l'utilizzazione dell'idrogeno viene infine sollecitato dalle cosiddette celle a combustibile, che convertono in elettricità l'energia chimica di un combustibile con cui vengono alimentate, in questo caso l'idrogeno. Il processo è esattamente l'inverso di quello elettrolitico: si genera elettricità sotto forma di corrente continua, acqua distillata e calore.

LE FONTI DI ENERGIA

1. Energia primaria e secondaria

Per il primo principio della Termodinamica, l'energia si conserva per definizione, sicché non si vede proprio perché dovremmo sforzarci di conservarla e risparmiarla. Il fatto che l'energia si conservi non implica tuttavia che la sua fruizione sia immediata o priva di uno sforzo non indifferente per averla a portata di mano. Sappiamo anzi, in virtù del secondo principio della Termodinamica, che essa sfugge continuamente alle nostre prese e, soprattutto, si degrada, cioè diminuisce la sua capacità di produrre lavoro, proprio ciò che più conta. Così, per rendere confortevole la nostra abitazione nei periodi in cui ci troviamo sottoposti ai rigori del freddo, che l'energia non si crei né si distrugga c'interessa poco: ciò che invece ci preme è che il calore erogato dai nostri radiatori disposti in particolari zone della nostra abitazione disperda all'esterno la minima quantità possibile di calore prodotto per riscaldarci. Ciò di cui abbiamo bisogno non è dunque, anzitutto, dell'energia generica, ma di risorse di energia suscettibili di essere adeguatamente trasformate nelle forme e nei modi che ci sono maggiormente utili e vantaggiosi, benché necessariamente sottoposti ai principi e alle leggi che governano l'intero universo.

Le materie prime, ma anche i fenomeni naturali che possono essere utilizzati per produrre energia, e dunque classificabili come risorse energetiche, vengono ordinariamente indicate come *energia primaria* proprio perché, a partire da esse e attraverso opportune trasformazioni, si ottiene la loro conversione in *energia secondaria*, quella pronta per essere "a portata di mano", che in definitiva ci consente di creare sviluppo economico e progresso sociale. Con riferimento alla natura stessa delle risorse in oggetto, ovvero il fatto di essere materie prime o fenomeni naturali, le distingueremo in *risorse energetiche rinnovabili* e *risorse energetiche non rinnovabili*.

La conversione da energia primaria a energia secondaria non è

cosa da poco; richiede conoscenze tecniche complesse e la costruzione di impianti adeguati come raffinerie per il petrolio greggio, centrali termoelettriche a carbone o a gas, centrali nucleari, pannelli solari o cellule fotovoltaiche, che ci permettono di produrre elettricità, benzina, gasolio, carbone da legna ecc. Non solo: l'energia secondaria deve poi essere distribuita e applicata, cioè diventare disponibile come servizio e dunque trasformarsi in energia effettivamente utile per azionare ad esempio una lavatrice, far muovere un'automobile, tenendo conto che in ogni momento dell'intero processo, dalla conversione all'utilizzazione, dobbiamo riscontrare ingenti perdite di energia: basti pensare che l'efficienza di utilizzo dell'energia primaria si attesta ancora sotto il 10%.

2. Le risorse energetiche rinnovabili

Si tratta di tutte quelle fonti la cui disponibilità costante in natura è garantita da un continuo e incessante reintegro per l'azione dei fenomeni naturali, che si produce in un arco temporale estremamente breve. A questa categoria appartengono l'energia solare, geotermica, eolica, idraulica, oceanica e mareomotrice; infine, l'energia prodotta da biomassa e da rifiuti solidi urbani.

a) L'energia solare

L'energia solare comprende, direttamente o indirettamente, la quasi totalità dell'energia disponibile – tanto quella derivante dal progressivo accumularsi di materiale, come nel caso della formazione del carbone, del petrolio e del metano, combustibili fossili – quanto quella proveniente da un processo chimico, come la fotosintesi terrestre e oceanica, nonché il moto dei venti e delle acque. Basti pensare che la radiazione che colpisce annualmente il nostro pianeta equivale a circa 15.000 volte l'attuale consumo mondiale di energia: si tratta, dunque, di una quantità enorme. Solo che la potenza captata dalla Terra non è interamente raccolta al suolo, e anche la quota che vi giunge subisce notevoli e inesorabili decurtamenti: se il 30% viene riflesso nello spazio e il 50% è assorbito e nuovamente irradiato, il restante 20% è responsabile del ciclo dell'acqua; solo una percentuale estremamente bassa dell'irraggiamento solare al suolo consente di fatto la vita. Non sorprenderà, così, che la media della radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre sia solo di $143,3 \text{ W/m}^2$, dal momento che essa viene a dipendere da nume-

cosa da poco; richiede conoscenze tecniche complesse e la costruzione di impianti adeguati come raffinerie per il petrolio greggio, centrali termoelettriche a carbone o a gas, centrali nucleari, pannelli solari o cellule fotovoltaiche, che ci permettono di produrre elettricità, benzina, gasolio, carbone da legna ecc. Non solo: l'energia secondaria deve poi essere distribuita e applicata, cioè diventare disponibile come servizio e dunque trasformarsi in energia effettivamente utile per azionare ad esempio una lavatrice, far muovere un'automobile, tenendo conto che in ogni momento dell'intero processo, dalla conversione all'utilizzazione, dobbiamo riscontrare ingenti perdite di energia: basti pensare che l'efficienza di utilizzo dell'energia primaria si attesta ancora sotto il 10%.

2. Le risorse energetiche rinnovabili

Si tratta di tutte quelle fonti la cui disponibilità costante in natura è garantita da un continuo e incessante reintegro per l'azione dei fenomeni naturali, che si produce in un arco temporale estremamente breve. A questa categoria appartengono l'energia solare, geotermica, eolica, idraulica, oceanica e mareomotrice; infine, l'energia prodotta da biomassa e da rifiuti solidi urbani.

a) L'energia solare

L'energia solare comprende, direttamente o indirettamente, la quasi totalità dell'energia disponibile – tanto quella derivante dal progressivo accumularsi di materiale, come nel caso della formazione del carbone, del petrolio e del metano, combustibili fossili – quanto quella proveniente da un processo chimico, come la fotosintesi terrestre e oceanica, nonché il moto dei venti e delle acque. Basti pensare che la radiazione che colpisce annualmente il nostro pianeta equivale a circa 15.000 volte l'attuale consumo mondiale di energia: si tratta, dunque, di una quantità enorme. Solo che la potenza captata dalla Terra non è interamente raccolta al suolo, e anche la quota che vi giunge subisce notevoli e inesorabili decurtamenti: se il 30% viene riflesso nello spazio e il 50% è assorbito e nuovamente irradiato, il restante 20% è responsabile del ciclo dell'acqua; solo una percentuale estremamente bassa dell'irraggiamento solare al suolo consente di fatto la vita. Non sorprenderà, così, che la media della radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre sia solo di 143,3 W/m², dal momento che essa viene a dipendere da nume-

rose condizioni, quali le stagioni, la latitudine, l'altitudine, le condizioni atmosferiche. Questa discontinuità rende la gestione dell'energia solare sia sotto forma di utilizzazione del calore (pannelli solari) sia della produzione di elettricità (celle fotovoltaiche), non ancora competitiva, benché notevoli passi in avanti siano stati fatti, tanto che, in determinate zone lontane dalle reti di alimentazione ordinaria, le celle solari costituiscono già da ora una strada economicamente percorribile.

b) L'energia geotermica

L'energia geotermica consiste nel calore generato all'interno della crosta terrestre, proveniente dal centro della Terra. È un tipo di energia che può essere debitamente recuperata sfruttando l'acqua calda o il vapore degli strati sotterranei delle zone vulcaniche, e che fuoriesce spontaneamente. Dato che scaturisce dal sottosuolo come vapore o calore, l'energia geotermica gode dell'indubbio vantaggio di evitare le spese di costruzione dei generatori di vapore, anche se denota un alto grado di impurità, oltre a pressioni e temperature non elevate. Si tratta di un inconveniente di non poco conto, giacché implica la costruzione di grandi turbine e condensatori e, a causa del gas e dei composti chimici presenti tanto nel vapore quanto nelle acque, come il radon (Rn), l'anidride carbonica (CO₂), l'anidride solforosa (SO₂), il boro (B), l'arsenico (A), l'ammoniaca (NH₃) e l'acido solfidrico (H₂S), comporta l'utilizzo di materiali particolarmente pregiati e costosi. È comunque indubbio che in presenza di anomalie termiche rilevanti nella crosta terrestre, la geotermia deve essere considerata, seppur necessariamente a livello locale (ad esempio Larderello in Toscana) o regionale (ad esempio Islanda, Nuova Zelanda, California settentrionale), una risorsa preziosa di energia termica e, come tale, adeguatamente utilizzata.

c) L'energia eolica

L'energia eolica deriva direttamente dal fenomeno ventoso, uno dei mezzi più antichi per produrre energia meccanica, ma anche il più complesso in virtù della natura irregolare o variabile del vento. La sua imprevedibilità nel tempo e nello spazio, cioè da momento a momento e da luogo a luogo, non è l'unico serio ostacolo per una sua proficua ed efficiente utilizzazione. La variabilità di questa fonte energetica copre infatti anche una vasta gamma di velocità, e l'effetto velocità è reso ancor più acuto dal fatto che l'entità della spin-

ta varia con il quadrato della velocità, mentre il lavoro compiuto nell'unità di tempo varia con il cubo della velocità. Ciò significa che data una raffica di vento otto volte maggiore della velocità media dello stesso – e la cosa può ben verificarsi in condizioni di tempesta – la forza del vento diviene ben 64 volte il valore della spinta normale, il che pone notevoli problemi tecnici nella costruzione della macchina eolica, denominata aerogeneratore allorché disposta alla produzione di elettricità. Il livello di competitività del motore eolico, con la sua caratteristica elica, non è ancora elevato ma, alla lunga, specie per impianti disposti in mare, è destinato ad aumentare, in particolare per l'apporto di Paesi come la Danimarca che, per condizioni ambientali particolarmente favorevoli e tradizioni culturali, ha investito notevolmente su questa risorsa energetica.

d) L'energia idraulica

L'energia idraulica è dovuta alla caduta di notevoli masse di acqua, o al suo fluire, ed è anch'essa fortemente condizionata da precise disponibilità idriche e, dunque, da un contesto geografico, meteorologico e geologico, nel senso che l'utilizzo di una simile risorsa richiede la presenza di bacini montani e fluviali tali da poter essere vantaggiosamente sfruttati. L'impatto sull'ambiente, e i costi per la creazione di sbarramenti e invasi, è assai elevato e può talvolta alterare in misura non marginale l'equilibrio dell'area interessata. Dato che il funzionamento di un impianto che sfrutta l'energia dell'acqua per generare elettricità è conveniente in regime di continuità, fattori quali il tempo, la portata e le sue variazioni, la circostanza rispetto alla richiesta dell'utenza, sono qualitativamente molto rilevanti in merito alla scelta di questa fonte energetica.

e) L'energia oceanica

L'energia oceanica trae la propria caratteristica specifica dall'enorme quantità di calore che quotidianamente le acque degli oceani assorbono dal Sole. Sfruttare questa risorsa significa utilizzare la differenza di temperatura esistente tra le acque calde superficiali e quelle fredde dei fondali oceanici. Tecnicamente è stato messo a punto un metodo, ancora in via sperimentale, denominato Otec (*Ocean Thermal Energy Conversion*). Il calore delle acque superficiali viene trasferito a un fluido intermediario a basso punto di ebollizione che, a sua volta, mette in azione una turbina per la produzione dell'elettricità. Le acque fredde servono ad alimentare un condensatore nel

quale viene incanalato il vapore. Le prove compiute consentono di coltivare interessanti aspettative di successo sebbene gli ostacoli siano ancora numerosi e per certi aspetti decisivi, visto che sono relativi alla scelta dei materiali più idonei per la costruzione dei condotti dell'acqua fredda e delle loro dimensioni.

f) L'energia mareomotrice

L'energia mareomotrice proviene dal moto alternativo delle masse di acqua, le onde e le maree. Le onde sono dovute indirettamente all'irraggiamento solare. Per essere adeguatamente sfruttato, il fenomeno ondoso, con le sue oscillazioni di massa, deve essere necessariamente gestito attraverso un sistema di accumulo energetico regolarizzato. Occorre tuttavia tener presente che lo stesso fenomeno ha caratteristiche specifiche che variano in relazione alle diverse circostanze geografiche e climatiche: sono favorevoli le condizioni in cui si è in presenza di onde frequenti e regolari, con altezza adeguata. Il problema principale per la gestione di questa disponibilità energetica sta nel predisporre un'utenza che possa operare nello stesso tempo e nello stesso luogo con il sistema che produce energia trasformata in elettricità. Detto in altri termini, là dove si è in presenza di un fenomeno ondoso con le caratteristiche richieste, converrà installare nelle immediate vicinanze del relativo impianto di elaborazione energetica, cioè di generazione di elettricità, un'utenza elettrica di pari potenza, ad esempio un impianto di dissalazione per la produzione di acqua dolce.

Ancor più significativo, sia per le masse d'acqua coinvolte sia per la possibilità di realizzare efficaci sistemi di accumulo, è lo sfruttamento delle onde di marea, fenomeno dovuto all'energia gravitazionale della Luna e del Sole, soprattutto dove l'altezza della marea è rilevante. La regolare periodicità del fenomeno, la possibilità di usare quali bacini di accumulo la morfologia di certe coste, come le foci fluviali e le aree non produttive di territorio, permette di realizzare impianti idroelettrici ad acqua fluente. Non vanno tuttavia sottovalutate le opere accessorie quali dighe e sbarramenti, che presentano costi elevati sul piano economico e, talvolta, ambientale. Un esempio di sfruttamento dell'energia delle maree ci è offerto dall'impianto che da oltre tre decenni opera in Francia sulle coste della Bretagna; grazie a una lunga diga si utilizza il moto dell'acqua sia quando la marea si innalza sia quando rifluisce. In questo modo, senza interruzioni, vengono messe in rotazione una serie

di turbine opportunamente collegate ad alternatori per produrre energia elettrica.

g) L'energia da biomassa

L'energia da biomassa deriva dalla materia vegetale, ed è anch'essa un prodotto dell'attività svolta dal Sole, a partire dalla legna da ardere. Si tratta di una risorsa energetica che presenta un'alta flessibilità, dal momento che può essere bruciata direttamente per produrre elettricità, oppure convertibile in combustibili liquidi e gassosi. I materiali di partenza sono in genere prodotti agricoli o loro derivati, in particolare la canna da zucchero e il mais che, sottoposti a fermentazione, danno luogo alla produzione di alcoli come l'etanolo o il metanolo. Mediante un processo di gassificazione con temperature che vanno dai 700 °C ai 900 °C si ottiene invece una miscela gassosa di idrogeno e monossido di carbonio con calore di combustione basso, ma sufficiente per generare vapore ed elettricità.

Un aspetto del tutto particolare è quello che riguarda la produzione di miscele aeriformi attraverso la fermentazione di rifiuti biologici, in specie i residui di animali in complessi agricoli e di allevamento. Queste miscele, denominate *biogas* possono essere gestite come il gas naturale; ciò che le differenzia da quest'ultimo sono le quantità di prodotto, ovviamente limitate, e il minor contenuto calorico e di pressione, cosa che determina la necessità di ridurre i consumi energetici per il trasporto predisponendo le strutture di consumo il più vicino possibile alla stessa unità produttiva.

b) L'energia da rifiuti solidi urbani

L'energia da rifiuti solidi urbani è prodotta da tutto ciò che si considera materiale di scarto proveniente da abitazioni, uffici ecc. Comprende residui alimentari, arredamento, e, soprattutto, materiale da imballaggio. L'idea che questo tipo di rifiuti possa essere considerato una vera e propria risorsa anche sul piano energetico (teleriscaldamento per usi civili o calore per usi tecnologici impiegato da utenze ubicate nelle immediate vicinanze) raccoglie un sempre più vasto consenso. L'utilizzo energetico del rifiuto solido, una delle fasi del recupero delle materie prime e del loro riciclaggio, consente poi un'efficace gestione del problema igienico e sanitario contribuendo alla riduzione del volume delle quantità di rifiuti da smaltire.

3. Le risorse energetiche non rinnovabili

Si tratta di tutte quelle fonti la cui presenza è esclusivamente dovuta all'evoluzione della Terra dal punto di vista geologico, biologico, e alla sua origine, sul piano termodinamico, il cui eventuale reintegro a seguito del loro sfruttamento prevede un decorso temporale di milioni di anni. Di questa categoria fanno parte i combustibili *fossili* solidi, liquidi e gassosi, nonché quelli *fissili*, come l'uranio.

a) *Combustibili fossili solidi*

I combustibili fossili solidi sono costituiti da resti di piante che si sono modificate dopo un processo durato milioni di anni, dando luogo a un materiale energetico che presenta caratteristiche chimiche che possono variare notevolmente e di diversa efficienza, cioè torba, lignite, litantrace, antracite, a seconda della percentuale di carbonio e del potere calorico, in ordine cronologico di formazione. La lignite, ad esempio, contiene un'alta percentuale di acqua e di sostanze volatili che la porta rapidamente alla decomposizione una volta a contatto con l'aria. La torba, prima fase di formazione di ciò che diverrà carbone in seguito alla completa eliminazione del contenuto di acqua residua grazie a temperatura e pressione sufficienti, è un materiale compatto con alto contenuto di carbonio. In genere, la lignite e la torba contengono circa un terzo dell'energia prodotta dal carbone fossile vero e proprio, cioè litantrace e antracite. Sul piano storico, il carbone può essere considerato il combustibile fossile più importante fino alla seconda metà del XX secolo, quando ha dovuto cedere il passo al petrolio e, attualmente, al gas naturale.

Il *combustibile fossile liquido* per eccellenza è il petrolio greggio, una miscela di idrocarburi facilmente estraibile con la perforazione del suolo, che si è formato principalmente, come del resto il gas naturale, dal plancton depositato nei bassi fondali marini tra i 2 e i 140 milioni di anni fa. Il petrolio è alla base dei consumi energetici per generazione di calore a bassa e media temperatura, quindi energia meccanica, e di consumi per la produzione di numerose materie prime di sintesi.

Il petrolio non è disponibile solo come greggio; si stima che gran parte delle riserve petrolifere che rimangono siano sotto forma di bitume, una sostanza simile al catrame, che impregna talune sabbie e certe particolari rocce denominate scisti. La sua estrazione, che ovviamente comporta l'apertura di miniere a cielo aperto, è dunque assai meno agevole rispetto alla semplice perforazione del sot-

3. Le risorse energetiche non rinnovabili

Si tratta di tutte quelle fonti la cui presenza è esclusivamente dovuta all'evoluzione della Terra dal punto di vista geologico, biologico, e alla sua origine, sul piano termodinamico, il cui eventuale reintegro a seguito del loro sfruttamento prevede un decorso temporale di milioni di anni. Di questa categoria fanno parte i combustibili *fossili* solidi, liquidi e gassosi, nonché quelli *fissili*, come l'uranio.

a) *Combustibili fossili solidi*

I combustibili fossili solidi sono costituiti da resti di piante che si sono modificate dopo un processo durato milioni di anni, dando luogo a un materiale energetico che presenta caratteristiche chimiche che possono variare notevolmente e di diversa efficienza, cioè torba, lignite, litantrace, antracite, a seconda della percentuale di carbonio e del potere calorico, in ordine cronologico di formazione. La lignite, ad esempio, contiene un'alta percentuale di acqua e di sostanze volatili che la porta rapidamente alla decomposizione una volta a contatto con l'aria. La torba, prima fase di formazione di ciò che diverrà carbone in seguito alla completa eliminazione del contenuto di acqua residua grazie a temperatura e pressione sufficienti, è un materiale compatto con alto contenuto di carbonio. In genere, la lignite e la torba contengono circa un terzo dell'energia prodotta dal carbone fossile vero e proprio, cioè litantrace e antracite. Sul piano storico, il carbone può essere considerato il combustibile fossile più importante fino alla seconda metà del XX secolo, quando ha dovuto cedere il passo al petrolio e, attualmente, al gas naturale.

Il *combustibile fossile liquido* per eccellenza è il petrolio greggio, una miscela di idrocarburi facilmente estraibile con la perforazione del suolo, che si è formato principalmente, come del resto il gas naturale, dal plancton depositato nei bassi fondali marini tra i 2 e i 140 milioni di anni fa. Il petrolio è alla base dei consumi energetici per generazione di calore a bassa e media temperatura, quindi energia meccanica, e di consumi per la produzione di numerose materie prime di sintesi.

Il petrolio non è disponibile solo come greggio; si stima che gran parte delle riserve petrolifere che rimangono siano sotto forma di bitume, una sostanza simile al catrame, che impregna talune sabbie e certe particolari rocce denominate scisti. La sua estrazione, che ovviamente comporta l'apertura di miniere a cielo aperto, è dunque assai meno agevole rispetto alla semplice perforazione del sot-

tosuolo; tuttavia, l'entità davvero enorme della risorsa giustifica eventuali costi aggiuntivi. Del resto, basti pensare che utilizzando gli attuali metodi di produzione, dunque trascurando l'innovazione tecnologica che, in questo settore, è quasi quotidiana, dalle sabbie bituminose presenti nel solo Stato di Alberta, in Canada, si ritiene di poter recuperare qualcosa come circa 300 miliardi di barili di petrolio: una quota addirittura superiore alle riserve di greggio dell'Arabia Saudita (il barile è l'unità di misura internazionalmente riconosciuta per il greggio, ed equivale a 138,8 chilogrammi). Sebbene in quantità inferiore, gli scisti bituminosi, rocce metamorfiche che derivano da rocce precedenti sottoposte a forti aumenti di temperatura o pressione, apportano anch'essi un contributo non certo trascurabile: si calcola che l'Austria ne disponga per un equivalente di 28 miliardi di barili di greggio, ma altri depositi sono presenti in Estonia, Brasile, Svezia, Stati Uniti e Cina. Considerati nel loro insieme, i depositi di sabbie e di scisti potrebbero dunque contenere una quota estremamente rilevante di barili di petrolio.

I *combustibili fossili gassosi* sono miscele aeriformi, in genere indicate come gas naturale, con una componente maggioritaria di metano. Come il petrolio, il gas naturale viene estratto dai giacimenti sotterranei e, in genere, è associato proprio ai giacimenti di greggio, tanto che è possibile stabilire un rapporto statistico tra il gas naturale presente quando viene recuperato un metro cubo di petrolio, cioè 105 m³. Il consumo del gas naturale consiste essenzialmente nella generazione di calore negli impianti di riscaldamento domestico, ma viene utilizzato anche come carburante per il trasporto, in impianti termoelettrici e, come sostituto del petrolio, per la produzione petrolchimica.

I combustibili fossili sono diversamente ripartiti e il loro reperimento è dunque diverso; il petrolio greggio e il gas naturale sono quasi sempre associati, ma la loro distribuzione non è uniforme rispetto a quella del carbone: si va dai membri dell'*Organization of Petroleum Exporting Countries* (Opec), sostanzialmente i Paesi del Golfo Persico (Arabia Saudita, Iran, Emirati Arabi, Iraq, Kuwait) e i loro associati (Algeria, Indonesia, Libia e Nigeria) cui va aggiunto il Venezuela, ai giacimenti posseduti dagli Stati Uniti, dal Messico, dalla Russia, dal Regno Unito, dalla Norvegia e dalla Cina. È infine doveroso osservare che i combustibili fossili non hanno lo stesso valore energetico: 1 chilogrammo (e non un litro) di petrolio greggio produce per combustione 10.000 *chilocalorie* (kcal), la stessa quan-

tità di carbone ne sviluppa 7000, mentre dal gas naturale se ne ottengono 8000. Per rendere agevole il confronto tra le diverse risorse energetiche si è stabilita, per convenzione, l'unità di misura *tonnellata equivalente di petrolio (tep)*: una tonnellata di petrolio (7,2 barili) equivale a 1,5 tonnellate di carbone o a 1000 metri cubi di gas naturale. Una *tep* equivale alla produzione di circa 4500 kWh di energia elettrica.

b) I combustibili fissili

I combustibili fissili hanno origine dalla formazione stessa del nostro universo, dagli stati attraversati dalla materia e dall'energia dai quali è stata accompagnata, cioè in seguito alla contrazione e successiva esplosione di stelle di grande massa, le supernove, le cui condizioni estreme di temperatura e pressione hanno dato luogo alla sintesi di elementi pesanti.

Ogni atomo, come è noto, consta di neutroni, particelle prive di carica elettrica, di protoni, particelle con carica elettrica positiva, infine di elettroni, particelle con carica elettrica uguale a quella dei protoni ma di segno negativo. Proprio perché il numero dei protoni, positivi, e degli elettroni, negativi, è il medesimo, l'atomo risulta neutro dal punto di vista elettrico. I protoni e i neutroni sono confinati nel nucleo atomico e mantenuti in questa condizione da forze nucleari.

I nuclei della maggior parte degli elementi naturali sono detti *stabili*, perché restano inalterati nel tempo; altri nuclei sono invece *instabili*, dal momento che si frantumano in un tempo brevissimo, circa un milionesimo di miliardesimo di secondo o in tempi relativamente lunghi, da qualche secondo a diverse centinaia di anni, e che presentano una certa debole radioattività. Se adeguatamente stimolati, ad esempio se urtati violentemente da un neutrone, questi nuclei tendono a rompersi, a spezzarsi immediatamente; per questo motivo gli elementi presenti nel sistema periodico i cui nuclei atomici mostrano questa caratteristica sono chiamati *fissili*.

In natura esiste un solo elemento fissile: l'uranio. È appunto questo elemento che, primariamente, costituisce la fonte energetica necessaria per la produzione di energia nucleare. Il nucleo dell'uranio ha 92 protoni (il suo numero atomico) mentre il numero dei neutroni, superiore a quello dei protoni, presenta, tra le altre, due varianti particolarmente importanti, entrambe con 92 protoni, ma l'una con 143 neutroni, l'altra con 146 neutroni. Gli atomi di uno stesso ele-

mento che presentano un numero diverso di neutroni sono detti *isotopi* di quell'elemento, in questo caso dell'uranio. Con il passare del tempo, gli isotopi tendono a diventare stabili acquisendo o cedendo neutroni. Ora, poiché la somma della massa dei protoni e dei neutroni costituisce la massa del nucleo atomico, la massa dei due isotopi dell'uranio considerati è, rispettivamente, 235 e 238. Possiamo così affermare che l'uranio naturale è composto, per circa lo 0,71% di ${}_{92}^{235}\text{U}$ fissile, di seguito indicato come consuetudine, per motivi di comodità, U-235, e, per circa il 99,29%, di ${}_{92}^{238}\text{U}$, per gli stessi motivi indicato U-238.

Se concentriamo in un piccolo volume una cospicua quantità di materiale fissile, c'è la possibilità che alcuni neutroni prodotti nelle poche fissioni naturali vadano a colpire altri nuclei spezzandoli e provocando altre fissioni. L'energia totale dei due nuclei residui, più leggeri, risultato della frammentazione del nucleo originario, risulta minore rispetto a quella di partenza perché l'energia disponibile viene immediatamente liberata.

Dal momento in cui un neutrone nasce attraverso la fissione, al momento in cui muore provocando una nuova fissione, passano circa venti milionesimi di secondo (2×10^{-5}): questa è la vita di un neutrone. In una reazione ordinaria, con il livello di potenza erogata dalla fissione costante, a una generazione di circa due milioni di miliardi di neutroni (2×10^{15}) pronti per provocare la fissione, dopo 2×10^{-5} secondi ne sorgono altrettanti, e così di seguito. Naturalmente, molti di questi neutroni sono in eccesso: in gran parte, vengono assorbiti dagli elementi della struttura nella quale avviene il processo e dallo stesso U-235, senza provocare fissioni; una quota di neutroni viene infine assorbita da U-238, che non è fissile. Si tratta di una percentuale degna della più interessata attenzione perché il destino che accompagna questi neutroni ha esiti di grande rilievo.

In effetti, la cattura da parte di U-238 di un neutrone dà luogo a un nuovo elemento. Questo elemento è U-239, instabile, con una vita media di ventitré minuti, caratterizzato dall'emissione spontanea di un elettrone, detta emissione $-\beta$. La corsa del nostro neutrone tuttavia non si arresta, perché proprio l'emissione spontanea consente la costituzione di un nuovo elemento: il nettunio, ${}_{93}^{239}\text{Np}$ o Np-239, instabile, con vita media di 2,3 giorni. L'emissione spontanea da parte del nettunio di un ulteriore elettrone produce infine un nuovo elemento non presente in natura: il plutonio, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ o Pu-239, instabile, con vita media di circa 24.000 anni.

Dunque, con la cattura di un neutrone la massa è aumentata da 238 a 239; l'emissione dal nucleo di un elettrone ha fatto salire a 93 il numero dei protoni, mentre il numero dei neutroni che era 147, cioè U-238 più un neutrone catturato, è sceso a 146. La stessa cosa avviene con il nettunio: una nuova emissione di un elettrone porta a 94 il numero atomico e fa scendere a 145 il numero dei neutroni, dando vita al plutonio, $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Il plutonio evidenzia caratteristiche nucleari molto simili a quelle di U-235, il combustibile vero e proprio; è fissile, e rappresenta il costituente principale delle armi nucleari. Originato da U-238, che per questo motivo è chiamato elemento *fertile*, compensa in parte il consumo di U-235 e, come vedremo, in certi casi addirittura lo supera. Ciò che produce energia non è, perciò, solo U-235, ma anche U-238, che in natura è circa 140 volte più abbondante del primo. Questo dato è particolarmente importante, dal momento che la percentuale di materiale fissile è, come si è avuto modo di precisare, inferiore all'1%, il che significa bassa probabilità di dar luogo a un processo di fissione in seguito a bombardamento di neutroni. A questo inconveniente si è ovviato utilizzando uranio naturale arricchito, generalmente con ossido di uranio al 3% di U-235.

Fino alla metà degli anni Ottanta, e ancora oggi nella maggioranza dei casi, per ogni nucleo di U-235 bruciato si producono 0,6 nuclei di Pu-239. Non si raggiunge perciò la parità: tanto uranio bruciato, tanto plutonio prodotto. Ciò è dovuto soprattutto al fatto che i neutroni vengono opportunamente rallentati attraverso una serie di collisioni con una sostanza chiamata, per l'appunto, *moderatore*. Infatti, affinché la probabilità che i neutroni si scontrino con i nuclei di U-235 sia massima, cioè tale da poter permettere l'autonomo e continuo sostentamento delle reazioni, e la probabilità che U-238 catturi gli stessi neutroni sia minima, l'energia posseduta dai neutroni deve essere all'incirca quella di agitazione termica. Per questo motivo, prima che i neutroni urtino i nuclei di uranio si opera in modo da decelerare di almeno cento volte la loro corsa, facendoli scontrare con le molecole di una sostanza che, per peso molecolare e densità, è in grado di rallentarli. A seconda dei casi, il *moderatore* può essere costituito da acqua naturale, da deuterio o da grafite. Attualmente disponiamo tuttavia di tecnologie idonee che riescono a produrre una quantità di plutonio maggiore rispetto alla quantità di U-235 consumata, dando vita così a un processo autofertilizzante.

La reazione dell'uranio mette in evidenza due caratteristiche proprie di ogni processo di fissione nucleare: in primo luogo, la quantità di energia prodotta da ogni singola fissione è molto grande. Se un grammo di petrolio ha un potere calorico di 10 kcal, il rapporto fra il potere calorico di un combustibile fissile come U-235 e quello del petrolio greggio è pari a circa 2 milioni; in secondo luogo, il processo di fissione innescato dall'assorbimento di un neutrone dal primo nucleo di U-235 continua autonomamente; i neutroni emessi in ogni fissione possono a loro volta indurla in altrettanti nuclei di U-235, ciascuno dei quali si spezza in due frammenti con produzione di neutroni e sviluppo di energia. Ha così luogo una reazione a catena che si autoalimenta garantendo una produzione continua di energia nucleare commutabile in elettricità.

Un'ulteriore riserva di combustibile nucleare è data dal torio (Th), un elemento naturale costituito da una sola variante o isotopo funzionale alla sua utilizzazione in questo contesto, cioè $^{232}_{90}\text{Th}$. L'abbondanza del torio è circa tripla rispetto alle riserve di uranio e la sua localizzazione coincide quasi sempre con quella di quest'ultimo.

L'idea di sfruttare il torio come combustibile per la produzione di energia nucleare risale alla fase iniziale dell'utilizzo di questa tecnologia, cioè a partire dal 1950, ed era motivata proprio dalla sua relativa abbondanza. Gli atomi di Th-232 non sono però facilmente scindibili; in compenso, catturano e assorbono assai facilmente neutroni, il che li trasforma in un isotopo dell'uranio, precisamente U-233, in grado di sostenere reazioni di fissione proprio come U-235. Ed è per questo che il Th-232 è considerato *fertile*, proprio come U-238. Attualmente, il flusso di neutroni necessario per il processo, cioè per giungere a U-233, avviene ricorrendo all'uranio arricchito, al plutonio o a entrambi.

L'utilizzazione del torio, o meglio del biossido di torio, come combustibile nucleare presenta indubbi vantaggi rispetto all'uranio. Anzitutto, la generazione di U-233 a partire da Th-232 è assai più efficiente rispetto a quella del plutonio a partire da U-238, in quanto dà luogo a una significativa riduzione di materiale non fissile che viene a crearsi nel corso del processo, ovvero meno scorie da smaltire, e, soprattutto, abbassa sensibilmente la percentuale di plutonio comunque presente nel materiale esausto. In secondo luogo, il biossido di torio (ThO_2) è più stabile del biossido di uranio (UO_2) e ha un punto di fusione almeno 500 volte maggiore, il che garantisce ulteriori margini di sicurezza. Infine, il biossido di

torio presenta una maggiore conducibilità termica rispetto al biossido di uranio.

La fissione non è l'unico modo possibile per liberare energia nucleare; a questo risultato è possibile giungere anche attraverso la fusione di nuclei più leggeri, come l'idrogeno, in nuclei più pesanti. Le stelle, in genere, sono composte in larghissima percentuale di idrogeno e di elio: condizioni al limite di temperatura e di pressione consentono di comprimere i nuclei e raggiungere la fusione.

La produzione controllata di energia nucleare da fusione non ha ancora oggi una veste sperimentale benché, in linea teorica, la sua possibilità, tanto in forma autofertilizzante quanto in quella non autofertilizzante, sia ampiamente dimostrata.

La reazione nucleare che si intende concretamente realizzare è la fusione del deuterio (D), un isotopo stabile e non reattivo che pesa il doppio dell'idrogeno (H), con il trizio (T), anch'esso un isotopo dell'idrogeno, radioattivo, tre volte più pesante di quest'ultimo, ottenendo elio (He) e un neutrone. L'energia liberata dalla fusione consiste nell'energia cinetica dei prodotti della reazione, cioè l'elio e il neutrone, ed è circa 4,2 volte maggiore, a parità di massa, di quella ottenuta attraverso la reazione di fissione. Per intenderci: l'energia da fusione nucleare è ben 8,4 milioni di volte quella liberata dal petrolio greggio.

Il deuterio è disponibile in quantità praticamente illimitata, basti pensare all'entità di idrogeno presente nell'acqua del mare, e a costi praticamente irrilevanti. Lo stesso, purtroppo, non si può dire del trizio, sostanzialmente introvabile, ma reperibile attraverso il litio (Li), un metallo alcalino. Il litio è un elemento leggero che presenta in natura due isotopi particolarmente interessanti: Li-6 rappresenta il 7,5% del litio naturale, e ha una elevata capacità di catturare neutroni; Li-7, che costituisce circa il 92,5% del litio naturale, con media capacità di catturare neutroni. I due isotopi del litio danno luogo a due diverse reazioni: la prima, con Li-6, avviene a temperatura costante e dà come risultato trizio ed elio; dalla seconda reazione, che invece avviene con assorbimento di calore, si ottengono trizio, elio e un neutrone. In questo modo, uno dei prodotti della reazione, il neutrone, attraverso la fertilizzazione del litio ci procura il trizio sufficiente per alimentare il processo di base. La quantità di litio rintracciabile in natura è pressoché pari a quella di U-238.

L'innesco controllato della miscela di deuterio e trizio non è stato ancora raggiunto a causa delle difficoltà tecniche da superare allor-

ché si deve avere a che fare con temperature dell'ordine dei 100 milioni di gradi e con densità elevatissime. È stata invece verificata sul versante bellico la fusione non controllata con la messa a punto degli armamenti termonucleari, la cosiddetta bomba H.

Alla continua rigenerazione del trizio, indispensabile per la reazione con il deuterio, si è tentato di ovviare ipotizzando altri tipi di reazione di fusione, non più autofertilizzanti. Il modello, in questo caso, è la reazione tra deuterio e deuterio che nel 50% dei casi dà come risultato il trizio e l'idrogeno e nell'altro 50% elio e neutrone.

Il potere calorico, in questa forma, è sostanzialmente uguale a quello ottenuto per fissione.

4. L'idrogeno

L'attenzione richiamata negli ultimi anni nei confronti di questo gas è giustificata dal fatto che le sue ampie e polivalenti caratteristiche lo rendono particolarmente preferibile per coprire quei settori dove l'utilizzo dell'elettricità è meno agevole; là dove, in buona sostanza, non si devono offrire grandi quantità di energia, come nel caso del calore di origine nucleare. Peraltro, la diffusione dell'idrogeno può esser facilitata dall'uso ormai sufficientemente consolidato del gas naturale, i cui sistemi di trasporto possono agevolmente essere sfruttati, fatte salve alcune precauzioni riguardanti i sistemi di controllo e di sicurezza.

A rigore, tuttavia, l'idrogeno *non* è una risorsa energetica ma una *forma di energia* risultante da altre sorgenti e, come tale, del tutto particolare. L'idrogeno è spesso prodotto, utilizzando il calore, tanto dal metano quanto dal carbone, ma è più che evidente che, in prospettiva, il suo sfruttamento a partire da questi processi ne renderebbe vana l'utilità, visto che metano e carbone sono risorse energetiche rilevanti. Un metodo molto più vantaggioso consiste nel processo di scomposizione dell'acqua, un bene prezioso che certo deve essere salvaguardato ma indiscutibilmente di facile accesso, secondo due procedimenti tecnologicamente già acquisiti: elettrolitico e termochimico. Il processo elettrolitico, che consiste nello scindere gli atomi di idrogeno e di ossigeno dell'acqua attraverso l'elettricità, è largamente sperimentato, benché i costi restino elevati per l'incidenza dovuta all'energia elettrica che, ovviamente, deve essere ottenuta attraverso altri e diversi procedimenti. Il sistema termo-

ché si deve avere a che fare con temperature dell'ordine dei 100 milioni di gradi e con densità elevatissime. È stata invece verificata sul versante bellico la fusione non controllata con la messa a punto degli armamenti termonucleari, la cosiddetta bomba H.

Alla continua rigenerazione del trizio, indispensabile per la reazione con il deuterio, si è tentato di ovviare ipotizzando altri tipi di reazione di fusione, non più autofertilizzanti. Il modello, in questo caso, è la reazione tra deuterio e deuterio che nel 50% dei casi dà come risultato il trizio e l'idrogeno e nell'altro 50% elio e neutrone.

Il potere calorico, in questa forma, è sostanzialmente uguale a quello ottenuto per fissione.

4. L'idrogeno

L'attenzione richiamata negli ultimi anni nei confronti di questo gas è giustificata dal fatto che le sue ampie e polivalenti caratteristiche lo rendono particolarmente preferibile per coprire quei settori dove l'utilizzo dell'elettricità è meno agevole; là dove, in buona sostanza, non si devono offrire grandi quantità di energia, come nel caso del calore di origine nucleare. Peraltro, la diffusione dell'idrogeno può esser facilitata dall'uso ormai sufficientemente consolidato del gas naturale, i cui sistemi di trasporto possono agevolmente essere sfruttati, fatte salve alcune precauzioni riguardanti i sistemi di controllo e di sicurezza.

A rigore, tuttavia, l'idrogeno *non* è una risorsa energetica ma una *forma di energia* risultante da altre sorgenti e, come tale, del tutto particolare. L'idrogeno è spesso prodotto, utilizzando il calore, tanto dal metano quanto dal carbone, ma è più che evidente che, in prospettiva, il suo sfruttamento a partire da questi processi ne renderebbe vana l'utilità, visto che metano e carbone sono risorse energetiche rilevanti. Un metodo molto più vantaggioso consiste nel processo di scomposizione dell'acqua, un bene prezioso che certo deve essere salvaguardato ma indiscutibilmente di facile accesso, secondo due procedimenti tecnologicamente già acquisiti: elettrolitico e termochimico. Il processo elettrolitico, che consiste nello scindere gli atomi di idrogeno e di ossigeno dell'acqua attraverso l'elettricità, è largamente sperimentato, benché i costi restino elevati per l'incidenza dovuta all'energia elettrica che, ovviamente, deve essere ottenuta attraverso altri e diversi procedimenti. Il sistema termo-

chimico – sostanzialmente un ciclo chiuso di reazioni chimiche a diverse temperature – è assai promettente, perché possono essere scelte temperature compatibili con gli attuali standard tecnologici, senza contare che il flusso termico che entra in gioco nel processo può essere reperito anche attraverso l'energia solare.

Un nuovo, notevole impulso verso l'utilizzazione dell'idrogeno viene infine sollecitato dalle cosiddette celle a combustibile, che convertono in elettricità l'energia chimica di un combustibile con cui vengono alimentate, in questo caso l'idrogeno. Il processo è esattamente l'inverso di quello elettrolitico: si genera elettricità sotto forma di corrente continua, acqua distillata e calore.

IL SURRISCALDAMENTO DEL PIANETA

1. Che cos'è una serra

Si tratta di una costruzione coperta interamente o in parte, costruita con lo scopo di modificare il microclima e, come tale, può essere provvisoria o stabile; una struttura che permette la coltivazione di certe piante, ma anche ortaggi, in luoghi e in periodi dell'anno che non ne prevedono la crescita spontanea. Ciò è possibile, appunto, realizzando un ambiente in cui le condizioni di crescita, ovvero la temperatura, l'umidità, la composizione dell'aria, la temperatura del terreno, l'intensità e la durata dell'esposizione luminosa, sono rigorosamente programmate. Trovare sulle nostre tavole, e prima ancora sui banchi dei mercati, dei pomodori succosi nel mese di dicembre è il risultato di questa tecnologia, sempre che, ovviamente, il prodotto non sia importato da Paesi in cui, nello stesso periodo stagionale, le condizioni climatiche ne consentano la crescita.

Le proprietà della struttura sono dovute al fatto che le radiazioni solari filtrano attraverso la copertura trasparente della serra, mentre quest'ultima trattiene il calore emesso dal terreno e dalle piante, determinando un aumento della temperatura all'interno dell'area circoscritta e modificandone il microclima. In Paesi come l'Italia, la Spagna e, in generale, tutti quelli che appartengono alla zona temperata del pianeta, l'irraggiamento solare è sufficiente a soddisfare le esigenze delle coltivazioni primaverili e autunnali; in inverno è talvolta necessario ricorrere all'illuminazione artificiale e a sistemi di riscaldamento ausiliario.

2. L'equilibrio termico terrestre

L'energia elettromagnetica inviata annualmente sulla Terra sotto forma di luce e calore non è immagazzinata completamente dal nostro pianeta; se così fosse, la temperatura terrestre continuerebbe a crescere al ritmo di qualche millesimo di grado

all'anno. Per converso, se venisse a mancare l'apporto solare, la superficie terrestre si posizionerebbe su una temperatura di equilibrio molto bassa, in lenta ma progressiva discesa verso un raffreddamento crescente. In effetti, come del resto è già stato osservato, se una parte dell'energia solare viene riflessa dall'atmosfera e dalla superficie terrestre, una percentuale assai più consistente viene assorbita dagli oceani e dalle superfici continentali, mentre il rimanente è fatto proprio dall'atmosfera.

Se adesso ci chiediamo qual è il valore medio della temperatura a livello del suolo terrestre, la sua esatta indicazione non può che provocare stupore e sconcerto. Lo stupore e lo sconcerto si giustificano col fatto che tale valore risulta essere di $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$: un dato del tutto incompatibile con quello della densità media dell'irraggiamento solare che, tenuto conto delle dimensioni del nostro pianeta, dovrebbe darci una temperatura al suolo di $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Da $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ c'è una differenza di $33\text{ }^{\circ}\text{C}$; ma da quale fonte trae origine questo calore? Come può insomma prodursi, cosa può dar luogo a un tale incremento di temperatura che consente di fatto la vita nelle forme a noi conosciute, ma anche il sostanziale equilibrio termico del pianeta che ci ospita? La risposta all'interrogativo non può essere ricercata guardando al calore proveniente dal centro caldo della Terra, il cui valore è davvero modesto (circa $1/5\text{ W/m}^2$). La sua manifestazione ci è rivelata dalla presenza di un gradiente termico nella crosta terrestre. Questo gradiente, cioè il rapporto tra la differenza di temperatura e la distanza di due punti in verticale all'interno della crosta terrestre, è mediamente di $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni cento metri di profondità. La soluzione dell'apparente rompicapo sta invece nella considerazione di due aspetti fondamentali: l'uno relativo alla natura dell'energia che penetra nell'atmosfera terrestre e a quella che invece ne fuoriesce; l'altro alla natura particolare di certi gas presenti nell'atmosfera terrestre; ciò consentirà, peraltro, la possibilità di una precisazione di carattere terminologico di particolare importanza.

Le radiazioni elettromagnetiche non sono tutte dello stesso tipo: ciò che le distingue è la loro lunghezza d'onda (λ). Più corta è la lunghezza d'onda, tanto più alta sarà la frequenza (ν), cioè il numero di oscillazioni nell'unità di tempo, e, di conseguenza, la quantità di energia trasmessa, secondo la formula $\epsilon = h\nu$. La lunghezza d'onda (λ) si misura in metri (m), la frequenza in hertz (Hz).

Lo spettro elettromagnetico, ovvero l'insieme delle onde elettromagnetiche emesse da una sorgente e distribuite secondo la loro lun-

ghezza d'onda (λ), comprende i raggi γ e x , le radiazioni ultraviolette, la luce visibile, la radiazione infrarossa o termica, le microonde e le onde radio: da una lunghezza d'onda di 10^{-14} metri per i raggi γ si giunge a una lunghezza d'onda di 10^3 metri per le onde radio. Ora, più è calda la fonte di emissione, più alta è la frequenza: il Sole irradia per circa la metà dello spettro visibile, cioè con la luce, il nostro pianeta al limite superiore dell'atmosfera; ma anche la Terra, riscaldata dall'energia solare, emette radiazioni, precisamente radiazioni infrarosse o termiche. L'energia che penetra nell'atmosfera terrestre è dunque diversa da quella che ne esce.

La seconda considerazione riguarda, come annunciavamo, certi gas, in particolare l'anidride carbonica (CO_2), la cui molecola possiede la peculiare caratteristica di trattenere in parte la radiazione infrarossa, proprio quella che caratterizza l'emissione terrestre.

Ecco allora cosa accade: l'energia del Sole che giunge sulla Terra è trasformata in calore; ma parte di questo calore viene respinto verso lo spazio, dove tuttavia l'anidride carbonica e altri gas, assieme al vapore acqueo, lo immettono nuovamente in tutte le direzioni innalzando così la temperatura della superficie terrestre e dell'atmosfera. È grazie a questa specie di calotta che si crea un innalzamento della temperatura di $33\text{ }^\circ\text{C}$ che rende possibile una temperatura al suolo di $+15\text{ }^\circ\text{C}$. In questo senso, ma solo in questo e in virtù di un'analogia, si è soliti indicare il fenomeno naturale del riscaldamento dell'atmosfera e l'innalzamento della temperatura media a livello del suolo terrestre come effetto serra. L'analogia, evidentemente comoda dal punto di vista intuitivo, consiste appunto nel fatto che come la tecnica di coltivazione in serra modifica una situazione ambientale dal punto di vista microclimatico, così l'azione dell'anidride carbonica, in concomitanza con la radiazione termica riemessa dalla Terra nell'atmosfera, concorre a determinare una particolare situazione climatica del nostro pianeta.

3. Il clima

Il termine deriva dalla lingua greca (*klima*) e significa *inclinazione*; con esso, generalmente, viene tuttavia indicato l'insieme delle condizioni atmosferiche medie che, nel corso di un lungo periodo temporale, caratterizzano una qualsiasi regione geografica, ad esempio quella equatoriale, ma la sua considerazione può essere estesa all'intero pianeta Terra.

La climatologia è la scienza che studia il clima, uno studio che, è opportuno precisarlo, differisce sul piano del metodo da quello proprio della meteorologia, della quale peraltro si avvale. Se la climatologia analizza l'andamento stagionale e annuale di certi elementi quali la temperatura, l'umidità, le precipitazioni, la pressione atmosferica – e ne elabora i valori medi che sono considerati validi per ampie regioni nel lungo periodo –, le variazioni “qui e ora” di quelle grandezze adeguatamente rilevate con gli strumenti sono oggetto della meteorologia. La paleoclimatologia, infine, non è che l'indagine delle condizioni climatiche che si sono verificate nell'arco delle passate ere geologiche. La Terra, in effetti, ha conosciuto diversi climi nella sua storia passata. Nel corso del Pleistocene, il primo dei due periodi del Quaternario, cioè da circa 1,6 milioni di anni or sono a circa 10.000 anni fa, il clima terrestre ha subito diverse instabilità che hanno provocato l'alternarsi di periodi glaciali e periodi interglaciali. I primi, cioè i periodi glaciali, sono caratterizzati da un repentino abbassamento della temperatura media e dall'espansione dei ghiacci; i secondi, i periodi interglaciali che si collocano tra una glaciazione e un'altra, registrano invece un generalizzato aumento della temperatura media col conseguente ritiro o arretramento delle masse ghiacciate e un cospicuo innalzamento del livello dei mari e degli oceani, prefigurando un clima che molto probabilmente si avvicina a quello attuale. L'Olocene, il secondo periodo del Quaternario che considera gli ultimi 10.000 anni della storia del nostro pianeta, compresa quella presente, è considerato da parte del mondo scientifico come un periodo interglaciale.

Il clima non dipende solo da fattori esterni, cioè dall'irraggiamento del Sole, dai moti terrestri e dalla loro interazione con l'atmosfera, ma anche da alcuni, fondamentali fattori interni. Oltre, naturalmente, al moto dell'aria nell'atmosfera, i principali agenti interni sono gli oceani, i ghiacciai e i vulcani, nonché l'orografia.

Le masse d'aria, soggette al riscaldamento in corrispondenza dell'equatore, tendono a sollevarsi e a riaffiorare, una volta raffreddate, all'altezza del suolo; ciò comporta, nella fascia equatoriale, condizioni di bassa pressione e, quasi sempre, cospicue precipitazioni. Nei periodi estivi, le masse di aria calda che si staccano dall'equatore si dispongono verso nord, nell'emisfero boreale, e verso sud, nell'emisfero australe. Nel momento in cui ricadono sui poli, queste masse d'aria originano alte pressioni e, raffreddandosi, creano

venti che, dai poli, si dirigono verso sud, dal Polo Nord, e verso nord, dal Polo Sud. La circolazione dell'aria è resa ancor più complessa per gli effetti provocati da una forza particolare, la forza di Coriolis. L'influenza di questa forza, prodotta dal moto di rotazione della Terra, tende a far deviare le masse d'aria verso destra, cioè in senso orario, nell'emisfero boreale e verso sinistra, cioè in senso antiorario, nell'emisfero australe. Nei due emisferi terrestri è poi presente una zona di alte pressioni subtropicali che creano correnti che spirano verso l'equatore originando gli alisei, venti che in regime costante soffiano da nordest nell'emisfero boreale e da sudest in quello australe.

Come l'aria, anche la massa d'acqua che costituisce gli oceani, il 70% dell'intera superficie terrestre, sposta il calore immagazzinato dal Sole nelle diverse regioni del pianeta e, in particolare, dai tropici alle zone polari: spostamento che tende a ridurre i dislivelli di temperatura nelle diverse zone della Terra attraverso le correnti oceaniche. Le più importanti correnti oceaniche, tanto quelle fredde quanto quelle calde, come la corrente che dal Golfo del Messico attraversa l'Oceano Atlantico in direzione nordest mitigando il clima del settentrione europeo, sono l'effetto di venti persistenti e delle differenze di temperatura e di salinità dell'acqua.

I ghiacciai coprono attualmente il 10% delle terre emerse e svolgono, assieme alle superfici innevate, un fondamentale ruolo nei riguardi del clima. Tanto il ghiaccio quanto la neve, infatti, riflettono quasi specularmente le radiazioni solari e contribuiscono a creare zone di aria fredda.

Anche l'attività vulcanica ha un ruolo particolarmente rilevante nello stato del clima, dal momento che si pone come agente di raffreddamento della temperatura del pianeta: i gas (in particolare l'anidride solforosa), le ceneri e il pulviscolo che raggiungono gli strati alti dell'atmosfera formano un ostacolo per le radiazioni solari.

4. I cosiddetti gas “serra”

Senza la presenza di una certa quantità di anidride carbonica (CO₂), tale da garantire l'effetto di assorbimento e di rilascio della radiazione termica, non ci sarebbe vita sul pianeta. Tuttavia, se questa quantità supera i limiti che regolano la temperatura al suolo, il fenomeno può essere così pronunciato da assumere proporzioni tali da portare il calore superficiale su valori che, allo stesso modo,

renderebbero di fatto impossibile la sopravvivenza. Così, come appare evidente, il problema con cui fare i conti non è tanto la presenza di determinati gas nell'atmosfera – in primo luogo, l'anidride carbonica – ma il dato, foriero di dovuta preoccupazione se dovesse essere riconosciuto come inequivocabile, che la loro quantità sembra essere in aumento.

La prima cosa da fare consiste nell'individuare gli agenti potenzialmente devastanti. In tal senso, è opportuno compiere una distinzione preliminare: quella tra emissioni e concentrazioni di un determinato gas o sostanza; ciò ci consentirà non solo di offrirne un elenco, ma anche di stabilire se la loro emissione e il loro accumulo deve o meno essere messo in conto al fattore antropico, ovvero alla presenza e all'attività dell'uomo.

In termini il più possibile sintetici, diremo che le *emissioni* di uno o più gas sono una specie di flusso, che può essere continuo ma anche discontinuo, mentre le *concentrazioni* consistono in un accumulo di quantitativi delle medesime sostanze, che è suscettibile di crescita ma anche di diminuzione per le caratteristiche proprie di tali sostanze, a partire dal tempo del loro decadimento. In tal senso, con la nozione di *persistenza* indicheremo il periodo medio nel corso del quale un determinato gas è presente e rimane tale nell'atmosfera. Il fatto che i gas siano non solo diversi tra loro nel senso della specifica caratteristica di trattenere l'energia che dalla Terra si dirige nell'atmosfera, ma che la loro diversità investa anche il loro potere di decadimento, complica indubbiamente il tentativo di una loro identificazione sul piano della loro attitudine a produrre un effetto "serra", indicato come il loro potenziale di riscaldamento globale, *Global Warming Potential* (Gwp).

Per superare la difficoltà, si è considerata l'anidride carbonica (CO_2) come gas di riferimento, quello sui cui valori vengono di volta in volta ordinati gli altri gas, tenendo conto proprio del loro periodo di permanenza nell'atmosfera e del loro potere di assorbimento. Il Gwp è, insomma, una specie di unità di misura. L'arco di tempo convenzionalmente scelto per la valutazione del Gwp di un determinato gas è cento anni. Così, se nel corso di un secolo il Gwp del protossido di azoto (N_2O) è x , significa che gli effetti in termini di riscaldamento globale considerati cumulativamente per cento anni di una molecola di protossido di azoto emesso saranno x volte maggiori di una corrispondente unità di anidride carbonica.

I principali gas a effetto “serra” sono quattro:

- esafluoruro di zolfo (SF_6);
- protossido di azoto (N_2O);
- metano (CH_4);
- anidride carbonica (CO_2).

a) L'esafluoruro di zolfo

L'esafluoruro di zolfo è un gas che viene utilizzato tanto nel settore dell'industria elettrica, come isolante, quanto in quello delle fonderie di magnesio. Non esistono valutazioni di una certa attendibilità sulle quote di emissione. Benché le quantità in gioco siano piccole, occorre considerare che la persistenza di questo gas in atmosfera è di circa 3200 anni e il suo Gwp è pari a 23.900, un valore non trascurabile.

b) Il protossido di azoto

Il protossido di azoto è un gas composto di azoto e ossigeno, scarsamente concentrato nell'atmosfera; tuttavia, la sua persistenza è di circa 120 anni e, cosa da non trascurare, la sua efficacia dal punto di vista dell'effetto “serra” è almeno duecento volte quella dell'anidride carbonica. Le principali attività legate alla produzione di questo gas fanno capo all'agricoltura, in particolare con l'uso di fertilizzanti azotati, per una quota di certo non inferiore a 8 milioni di tonnellate all'anno che, ovviamente, vanno ad aggiungersi ai quantitativi assai più cospicui, ma non ancora ben determinati, di origine naturale. L'assorbimento di questo gas è principalmente a carico delle masse oceaniche.

c) Il metano

Il metano lega le proprie emissioni naturali alle mangrovie e alle paludi, nel senso che risulta come il prodotto della decomposizione e fermentazione, in ambiente privo di ossigeno, di materiale organico. I settori che ne determinano l'emissione assai elevata, fino a 371 milioni di tonnellate annue, da attribuire all'attività umana sono almeno quattro. Anzitutto, l'ambito della produzione del gas naturale, dove si verificano significative perdite sia in sede di perforazione sia di produzione, che vanno ad aggiungersi a quelle connesse con l'estrazione del petrolio greggio; in secondo luogo, il settore dell'estrazione del carbone; in terzo luogo, parte delle emissioni sono dovute all'allevamento zootecnico; infine, le discariche di rifiuti.

d) *L'anidride carbonica*

L'anidride carbonica o, meglio, il carbonio, viene rilasciato dagli ecosistemi attraverso la respirazione delle piante e degli animali. Sul versante delle concentrazioni, il carbonio è cumulato nell'atmosfera terrestre, nella biosfera, negli oceani, dove si diffonde semplicemente e viene convertito in diversi modi, infine nei sedimenti, dal momento che il carbonio si fissa sulle rocce. In assenza di attività antropica, tanto carbonio viene emesso, tanto ne viene assorbito nel breve periodo. La situazione cambia allorché si prendono in considerazione gli svariati ambiti nei quali si esercita l'opera dell'uomo giacché, in questo caso, si è in presenza di valori che tendono a crescere. Le concentrazioni di anidride carbonica sono cresciute in media dello 0,4% all'anno dal Settecento, con punte di 0,6% negli ultimi dieci anni. Poco importa, d'altronde, che le emissioni legate all'opera dell'uomo siano notevolmente inferiori a quelle del ciclo naturale: esse sono comunque sufficienti a destabilizzare il sistema e a provocare un incremento delle concentrazioni. Su questo punto non vi è il minimo dubbio, così come è fuori discussione che la temperatura media del pianeta stia aumentando.

5. Energia e ambiente

Se ci si chiede quali sono le attività umane in grado di condizionare in modo preoccupante il sistema di equilibrio termico del pianeta, non c'è dubbio che la risposta comprenda, anzitutto, le attività legate all'emissione di gas "serra" e, in secondo luogo, la sistematica opera di impoverimento dei serbatoi, dei magazzini naturali degli stessi gas, in particolare di quelli che consentono l'assorbimento dell'anidride carbonica. Le attività direttamente legate all'emissione di gas "serra" derivano essenzialmente dal consumo dei combustibili fossili, ovvero la produzione dell'energia e il suo sfruttamento, cui si aggiungono alcune produzioni di carattere industriale e agricolo. Occorre tuttavia prendere in seria considerazione che i modi attraverso i quali l'energia viene prodotta provoca conseguenze diverse in relazione alle fonti energetiche che vengono utilizzate per produrla. I combustibili fossili, ammesso e non concesso che il loro grado di purezza sia ottimale, producono *fisiologicamente* anidride carbonica e acqua. Detto in altri termini, quando c'è combustione si ha inevitabilmente produzione ed emissione di anidride carbonica. Per ogni unità di anidride carbonica prodotta dal carbone, il petrolio

e il metano o il gas naturale ne producono circa due terzi. Ciò avviene:

- nel passaggio dall'energia primaria all'energia secondaria, cioè la produzione di elettricità;
- nel settore della trazione, cioè dell'energia disponibile per la mobilità e i trasporti;
- nella produzione di calore per uso industriale o per riscaldamento domestico.

Per motivi di coerenza e di completezza, dobbiamo a questo punto osservare che, in primo luogo, nei combustibili fossili sono di fatto presenti impurità che possono restare tali, o subire alterazioni, una volta avvenuta la combustione; in secondo luogo, che la combustione in aria porta i componenti dei combustibili a temperature molto elevate, con la conseguente produzione di ossidi di azoto. Distingueremo così, da un lato, le sostanze presenti nei combustibili *prima* della combustione che danno luogo a veleni *dopo* la combustione (tra queste trovano posto anche quelle sostanze che restano inalterate), dall'altro lato, le sostanze tossiche e velenose *create* dalla combustione.

Alla prima categoria di sostanze appartiene lo zolfo (S), anch'esso un combustibile. Reagendo con l'ossigeno, lo zolfo produce anidride solforosa (SO_2), da cui l'anidride solforica (SO_3) e l'acido solforico (H_2SO_4). Lo zolfo è presente nel carbone con una percentuale variabile tra lo 0,3% e il 10% e nell'olio combustibile, residuo della distillazione del petrolio greggio. Nel gas naturale lo zolfo è talvolta presente sotto forma di acido solfidrico (H_2S).

I combustibili fossili solidi e liquidi presentano anche frazioni di materiale che sfuggono alla combustione e che si aggiungono alla esigua quota di combustibile che non brucia; questo aspetto è particolarmente evidente per quanto riguarda il carbone, che presenta un contenuto di ceneri di circa il 10%, mentre la percentuale propria del petrolio è trascurabile. Senza parlare della benzina, che contiene una percentuale di piombo tetraetile, $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$. Parte di questo elemento velenoso che non partecipa alla combustione fuoriesce con i gas di scarico degli automezzi depositandosi al suolo. In ultimo non può essere trascurata la contaminazione radioattiva del carbone e del metano. Il carbone contiene uranio e torio (alcune parti per milione), che finiscono in isotopi del piombo, stabili e non radioattivi. In virtù del periodo di dimezzamento, l'attività radioattiva è modesta: U-238 ha un periodo di 4,5 miliardi di anni, U-235 di 0,7 miliardi di anni, il to-

rio di 14,5 miliardi di anni. Tuttavia, una tonnellata di carbone emette ogni secondo dalle 50.000 alle 70.000 particelle. In massima parte questa radioattività, nel caso di grandi impianti termoelettrici, è imprigionata nelle scorie di carbone e il residuo emesso nell'atmosfera; molto più alta è invece la radiazione rilasciata nel caso di combustione per usi domestici o in piccoli impianti di riscaldamento. Anche il metano presenta una leggera radioattività, associata alla presenza in esso, in percentuale variabile, del radon (Rn), un gas radioattivo.

Per quanto riguarda la seconda categoria di sostanze tossiche prodotte dalla combustione, cioè quelle non presenti nel combustibile ma create dalla stessa combustione, sono due gli agenti velenosi di cui non si può trascurare la pericolosità ambientale. Il primo agente è l'ossido di carbonio (CO), prodotto da una combustione incompleta, la cui emissione è dovuta in massima parte al settore della trazione e dei trasporti, cui va ad aggiungersi una modesta porzione da addebitare all'industria manifatturiera e alla vita domestica. Il secondo agente è costituito dagli ossidi di azoto. Anche in questo caso i mezzi di trasporto sono responsabili per almeno la metà delle emissioni in atmosfera, cui si somma una discreta percentuale da imputare alle centrali termoelettriche. La distruzione e, di conseguenza, l'impoverimento dei magazzini naturali di contenimento dei gas "serra" costituiscono il secondo motivo di preoccupazione per l'equilibrio termico della Terra. Ciò è dovuto, essenzialmente, alla distruzione diretta e indiretta delle aree boschive, delle foreste che godono della proprietà di assorbire anidride carbonica. In modo diretto, le foreste vengono distrutte sia per motivi legati alla produzione di energia sia per strategie di sviluppo agricolo, dal momento che la deforestazione consente un diverso uso e destinazione dei territori. Indirettamente, le aree boschive sono costantemente minacciate da fenomeni legati all'inquinamento provocato, per la maggior parte, dalle sostanze tossiche emesse nell'atmosfera (da cui le piogge acide), a partire da quegli agenti che, pur non essendo potenzialmente influenti sull'aumento della temperatura, sono comunque legati alla combustione.

6. Che cosa ci dovremo aspettare?

Fare previsioni sul futuro climatico del pianeta Terra non è impresa da poco. La sfida è appena iniziata e, come tale, necessita di continue modifiche e aggiustamenti a partire da una consapevolezza di fondo: l'impossibilità, almeno allo stato attuale, di giungere a formula-

re risposte certe e definitive. Chiunque, del resto, si rende perfettamente conto che la stessa “banale” previsione meteorologica, ben più limitata e ristretta, se offre dati attendibili non può comunque garantire che il concreto sviluppo degli eventi atmosferici si verifichi come annunciato. I fattori che entrano in gioco, le cosiddette variabili di cui tener conto, sono tali e complesse, specie per quanto riguarda la loro reciproca interazione, da lasciare ampi margini di incertezza. Questa incertezza va a scapito della precisione delle eventuali previsioni.

In linea generale, prevedere l'aumento medio della temperatura, più o meno marcato in relazione alle concentrazioni dei gas “serra”, sembra una partita che è possibile giocare assumendo come riferimento necessario gli effetti che l'incremento termico provoca sui fenomeni elementari. È tuttavia doveroso precisare che non c'è unanimità nel mondo scientifico nell'accettare una relazione lineare, di causa ed effetto, tra aumento della temperatura e concentrazioni. Ciò non toglie che tanto in sede nazionale, cioè dei singoli Paesi, quanto in ambito internazionale, si siano compiuti, e si stiano attualmente compiendo, gli sforzi necessari per giungere a formulare degli scenari il più possibile realistici, tali cioè da poter costituire una base ragionevole per lo sviluppo di una serie di azioni preventive. In tal senso, nel 1988 due istituti dell'Organizzazione delle nazioni unite (Onu), il *World Meteorological Organization* (Wmo) e l'*United Nation Environment Programme* (Unep), hanno costituito un nuovo organismo, l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Ipcc) i cui ricercatori, a partire dal 1990, hanno elaborato ben tre fondamentali rapporti a proposito del cambiamento climatico. Gli ultimi risultati, che tengono tra l'altro presenti i dati relativi allo sviluppo economico e alla crescita demografica delle diverse nazioni della Terra, sono stati elaborati, con l'ausilio di modelli matematici particolarmente complessi noti come *General Circulation Models* (Gcm), attraverso potenti computer.

Sembra ormai assodato che le attività umane abbiano influito in passato, e continueranno a influire anche in futuro, sull'aumento delle concentrazioni di anidride carbonica nell'atmosfera. Ciò si rifletterà sulla temperatura, che aumenterà.

Nel secolo appena trascorso, l'incremento termico è stato calcolato intorno a 0,6 °C, ed è probabile che il fenomeno sia stato provocato, se non interamente almeno in parte, dall'effetto “serra” originato dall'impatto che le attività tecnologiche umane hanno provocato sull'ambiente. Si badi bene: il dato appena riportato non vuol dire

che, attualmente, le temperature rilevate sono tutte più elevate di oltre mezzo grado centigrado. In realtà, a subire un incremento sono state soprattutto le temperature minime, quelle cioè registrate di notte. L'aumento sul piano globale delle temperature minime rispetto alle temperature massime, registrate di giorno, è confermato tanto nell'emisfero boreale che in quello australe e per le rispettive stagioni. Nel periodo compreso tra il 1950 e il 1993, le temperature diurne hanno registrato una tendenza alla crescita di $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni dieci anni, mentre le temperature notturne sono cresciute di $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il riscaldamento si è rivelato maggiore nella stagione invernale e nelle aree più fredde quali, ad esempio, la Siberia e le regioni nordoccidentali dell'America settentrionale.

Ora, non c'è dubbio che un riscaldamento che interessi i periodi freddi, nel caso in cui non aumentino anche temperature massime, è preferibile a un innalzamento termico che si verifichi nei periodi caldi; può risultare persino auspicabile, perché può significare una maggiore produzione agricola. Ma è altrettanto certo che se i valori minimi continueranno a crescere, ciò investirà inevitabilmente anche i valori massimi. Quanto consistente sarà l'aumento termico che ci dovremo attendere di qui al 2100 è un dato che, purtroppo, sfugge alle odierne capacità di previsione. L'inadeguatezza delle simulazioni elaborate, che stimano un incremento che oscilla tra $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, non consente di avere certezze. Peraltro, l'innalzamento della temperatura non sarà uniformemente esteso e, nel computo, dovranno essere tenute in debita considerazione le emissioni sul piano locale di composti, come l'anidride solforosa (SO_2), che tendono a raffreddare l'atmosfera, e l'azione degli aerosol.

Il calore, come sappiamo, favorisce l'evaporazione dell'acqua. Sul piano dei fenomeni elementari l'innalzamento termico è così associato all'aumento delle precipitazioni atmosferiche. Di per sé, anche in questo caso, l'incremento della piovosità può non costituire un problema. Tuttavia, un impulso che dovesse prolungarsi nel tempo e con decisa intensità potrebbe accrescere il rischio di inondazioni. Ciò non vuol dire che si dovrà far fronte con maggiore frequenza a tempeste e uragani: insomma, a condizioni climatiche estreme. Non solo non ci sono prove decisive che, nel corso del XX secolo, eventi di questo genere si siano moltiplicati, ma le stesse tempeste tropicali ed extratropicali subiscono variazioni multidecennali o anche tra un decennio e un altro, sicché non si registrano in modo evidente tendenze a lungo termine. Su questo punto è poi importante

mettere in chiaro che il principale fattore potenzialmente responsabile di eventi catastrofici di questo tipo è, in realtà, la pianificazione del territorio, ovvero la conservazione delle aree palustri che rallentano le piene, il controllo dei deflussi, la manutenzione dei corsi d'acqua e degli invasi. Contrariamente a quanto ci si potrebbe invece attendere, l'aumento delle precipitazioni non attenuerà il fenomeno della siccità: al contrario, in alcune aree e in determinate stagioni, la siccità è destinata ad aumentare.

Il cambiamento climatico provocherà anche un innalzamento dei mari. Nell'ultimo secolo, il livello delle acque salate si è alzato su scala planetaria di una quota compresa tra i 10 e i 25 centimetri. Per i prossimi cento anni, si prevede un innalzamento compreso tra i 31 e i 49 centimetri. L'espansione fisica degli oceani e dei mari è dovuta essenzialmente all'incremento della temperatura, alla maggiore quantità di acqua dolce che dalle montagne fluisce verso il mare, e che comprende anche una quantità relativa al ritiro dei ghiacciai. Non si può invece affermare niente di significativo e di attendibile sul comportamento che, nella circostanza, assumerà la calotta polare artica.

Non sono infine disponibili modelli o dati in grado di poter rilevare una stretta correlazione tra il riscaldamento globale e l'intensificazione di eventi meteorologici come quello denominato *El Niño* (il bambino, in lingua spagnola), correlazione peraltro seriamente messa in dubbio da consistenti ricerche di carattere storico. Il fenomeno, giunto all'attenzione generale nel 1982 e, in seguito, nel 1997, si presenta con andamento ciclico ogni tre o cinque anni negli ultimi cinquemila anni, e consiste in un riscaldamento delle acque dell'Oceano Pacifico a causa di un anomalo comportamento degli alisei. Normalmente, gli alisei spirano da est verso ovest spingendo nella stessa direzione l'acqua tiepida di superficie dell'oceano. Questo movimento richiama, per converso, le acque profonde e fredde delle coste occidentali dell'America centromeridionale. Nei mesi invernali gli alisei si indeboliscono, l'acqua fredda che sale in superficie diminuisce e aumenta la temperatura media delle acque superficiali condizionando il clima e dando luogo a intense precipitazioni atmosferiche.

IL SURRISCALDAMENTO DEL PIANETA

1. Che cos'è una serra

Si tratta di una costruzione coperta interamente o in parte, costruita con lo scopo di modificare il microclima e, come tale, può essere provvisoria o stabile; una struttura che permette la coltivazione di certe piante, ma anche ortaggi, in luoghi e in periodi dell'anno che non ne prevedono la crescita spontanea. Ciò è possibile, appunto, realizzando un ambiente in cui le condizioni di crescita, ovvero la temperatura, l'umidità, la composizione dell'aria, la temperatura del terreno, l'intensità e la durata dell'esposizione luminosa, sono rigorosamente programmate. Trovare sulle nostre tavole, e prima ancora sui banchi dei mercati, dei pomodori succosi nel mese di dicembre è il risultato di questa tecnologia, sempre che, ovviamente, il prodotto non sia importato da Paesi in cui, nello stesso periodo stagionale, le condizioni climatiche ne consentano la crescita.

Le proprietà della struttura sono dovute al fatto che le radiazioni solari filtrano attraverso la copertura trasparente della serra, mentre quest'ultima trattiene il calore emesso dal terreno e dalle piante, determinando un aumento della temperatura all'interno dell'area circoscritta e modificandone il microclima. In Paesi come l'Italia, la Spagna e, in generale, tutti quelli che appartengono alla zona temperata del pianeta, l'irraggiamento solare è sufficiente a soddisfare le esigenze delle coltivazioni primaverili e autunnali; in inverno è talvolta necessario ricorrere all'illuminazione artificiale e a sistemi di riscaldamento ausiliario.

2. L'equilibrio termico terrestre

L'energia elettromagnetica inviata annualmente sulla Terra sotto forma di luce e calore non è immagazzinata completamente dal nostro pianeta; se così fosse, la temperatura terrestre continuerebbe a crescere al ritmo di qualche millesimo di grado

IL SURRISCALDAMENTO DEL PIANETA

1. Che cos'è una serra

Si tratta di una costruzione coperta interamente o in parte, costruita con lo scopo di modificare il microclima e, come tale, può essere provvisoria o stabile; una struttura che permette la coltivazione di certe piante, ma anche ortaggi, in luoghi e in periodi dell'anno che non ne prevedono la crescita spontanea. Ciò è possibile, appunto, realizzando un ambiente in cui le condizioni di crescita, ovvero la temperatura, l'umidità, la composizione dell'aria, la temperatura del terreno, l'intensità e la durata dell'esposizione luminosa, sono rigorosamente programmate. Trovare sulle nostre tavole, e prima ancora sui banchi dei mercati, dei pomodori succosi nel mese di dicembre è il risultato di questa tecnologia, sempre che, ovviamente, il prodotto non sia importato da Paesi in cui, nello stesso periodo stagionale, le condizioni climatiche ne consentano la crescita.

Le proprietà della struttura sono dovute al fatto che le radiazioni solari filtrano attraverso la copertura trasparente della serra, mentre quest'ultima trattiene il calore emesso dal terreno e dalle piante, determinando un aumento della temperatura all'interno dell'area circoscritta e modificandone il microclima. In Paesi come l'Italia, la Spagna e, in generale, tutti quelli che appartengono alla zona temperata del pianeta, l'irraggiamento solare è sufficiente a soddisfare le esigenze delle coltivazioni primaverili e autunnali; in inverno è talvolta necessario ricorrere all'illuminazione artificiale e a sistemi di riscaldamento ausiliario.

2. L'equilibrio termico terrestre

L'energia elettromagnetica inviata annualmente sulla Terra sotto forma di luce e calore non è immagazzinata completamente dal nostro pianeta; se così fosse, la temperatura terrestre continuerebbe a crescere al ritmo di qualche millesimo di grado

all'anno. Per converso, se venisse a mancare l'apporto solare, la superficie terrestre si posizionerebbe su una temperatura di equilibrio molto bassa, in lenta ma progressiva discesa verso un raffreddamento crescente. In effetti, come del resto è già stato osservato, se una parte dell'energia solare viene riflessa dall'atmosfera e dalla superficie terrestre, una percentuale assai più consistente viene assorbita dagli oceani e dalle superfici continentali, mentre il rimanente è fatto proprio dall'atmosfera.

Se adesso ci chiediamo qual è il valore medio della temperatura a livello del suolo terrestre, la sua esatta indicazione non può che provocare stupore e sconcerto. Lo stupore e lo sconcerto si giustificano col fatto che tale valore risulta essere di $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$: un dato del tutto incompatibile con quello della densità media dell'irraggiamento solare che, tenuto conto delle dimensioni del nostro pianeta, dovrebbe darci una temperatura al suolo di $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Da $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ c'è una differenza di $33\text{ }^{\circ}\text{C}$; ma da quale fonte trae origine questo calore? Come può insomma prodursi, cosa può dar luogo a un tale incremento di temperatura che consente di fatto la vita nelle forme a noi conosciute, ma anche il sostanziale equilibrio termico del pianeta che ci ospita? La risposta all'interrogativo non può essere ricercata guardando al calore proveniente dal centro caldo della Terra, il cui valore è davvero modesto (circa $1/5\text{ W/m}^2$). La sua manifestazione ci è rivelata dalla presenza di un gradiente termico nella crosta terrestre. Questo gradiente, cioè il rapporto tra la differenza di temperatura e la distanza di due punti in verticale all'interno della crosta terrestre, è mediamente di $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni cento metri di profondità. La soluzione dell'apparente rompicapo sta invece nella considerazione di due aspetti fondamentali: l'uno relativo alla natura dell'energia che penetra nell'atmosfera terrestre e a quella che invece ne fuoriesce; l'altro alla natura particolare di certi gas presenti nell'atmosfera terrestre; ciò consentirà, peraltro, la possibilità di una precisazione di carattere terminologico di particolare importanza.

Le radiazioni elettromagnetiche non sono tutte dello stesso tipo: ciò che le distingue è la loro lunghezza d'onda (λ). Più corta è la lunghezza d'onda, tanto più alta sarà la frequenza (ν), cioè il numero di oscillazioni nell'unità di tempo, e, di conseguenza, la quantità di energia trasmessa, secondo la formula $\epsilon = h\nu$. La lunghezza d'onda (λ) si misura in metri (m), la frequenza in hertz (Hz).

Lo spettro elettromagnetico, ovvero l'insieme delle onde elettromagnetiche emesse da una sorgente e distribuite secondo la loro lun-

ghezza d'onda (λ), comprende i raggi γ e x , le radiazioni ultraviolette, la luce visibile, la radiazione infrarossa o termica, le microonde e le onde radio: da una lunghezza d'onda di 10^{-14} metri per i raggi γ si giunge a una lunghezza d'onda di 10^3 metri per le onde radio. Ora, più è calda la fonte di emissione, più alta è la frequenza: il Sole irradia per circa la metà dello spettro visibile, cioè con la luce, il nostro pianeta al limite superiore dell'atmosfera; ma anche la Terra, riscaldata dall'energia solare, emette radiazioni, precisamente radiazioni infrarosse o termiche. L'energia che penetra nell'atmosfera terrestre è dunque diversa da quella che ne esce.

La seconda considerazione riguarda, come annunciavamo, certi gas, in particolare l'anidride carbonica (CO_2), la cui molecola possiede la peculiare caratteristica di trattenere in parte la radiazione infrarossa, proprio quella che caratterizza l'emissione terrestre.

Ecco allora cosa accade: l'energia del Sole che giunge sulla Terra è trasformata in calore; ma parte di questo calore viene respinto verso lo spazio, dove tuttavia l'anidride carbonica e altri gas, assieme al vapore acqueo, lo immettono nuovamente in tutte le direzioni innalzando così la temperatura della superficie terrestre e dell'atmosfera. È grazie a questa specie di calotta che si crea un innalzamento della temperatura di $33\text{ }^\circ\text{C}$ che rende possibile una temperatura al suolo di $+15\text{ }^\circ\text{C}$. In questo senso, ma solo in questo e in virtù di un'analogia, si è soliti indicare il fenomeno naturale del riscaldamento dell'atmosfera e l'innalzamento della temperatura media a livello del suolo terrestre come effetto serra. L'analogia, evidentemente comoda dal punto di vista intuitivo, consiste appunto nel fatto che come la tecnica di coltivazione in serra modifica una situazione ambientale dal punto di vista microclimatico, così l'azione dell'anidride carbonica, in concomitanza con la radiazione termica riemessa dalla Terra nell'atmosfera, concorre a determinare una particolare situazione climatica del nostro pianeta.

3. Il clima

Il termine deriva dalla lingua greca (*klima*) e significa *inclinazione*; con esso, generalmente, viene tuttavia indicato l'insieme delle condizioni atmosferiche medie che, nel corso di un lungo periodo temporale, caratterizzano una qualsiasi regione geografica, ad esempio quella equatoriale, ma la sua considerazione può essere estesa all'intero pianeta Terra.

ghezza d'onda (λ), comprende i raggi γ e x , le radiazioni ultraviolette, la luce visibile, la radiazione infrarossa o termica, le microonde e le onde radio: da una lunghezza d'onda di 10^{-14} metri per i raggi γ si giunge a una lunghezza d'onda di 10^3 metri per le onde radio. Ora, più è calda la fonte di emissione, più alta è la frequenza: il Sole irradia per circa la metà dello spettro visibile, cioè con la luce, il nostro pianeta al limite superiore dell'atmosfera; ma anche la Terra, riscaldata dall'energia solare, emette radiazioni, precisamente radiazioni infrarosse o termiche. L'energia che penetra nell'atmosfera terrestre è dunque diversa da quella che ne esce.

La seconda considerazione riguarda, come annunciavamo, certi gas, in particolare l'anidride carbonica (CO_2), la cui molecola possiede la peculiare caratteristica di trattenere in parte la radiazione infrarossa, proprio quella che caratterizza l'emissione terrestre.

Ecco allora cosa accade: l'energia del Sole che giunge sulla Terra è trasformata in calore; ma parte di questo calore viene respinto verso lo spazio, dove tuttavia l'anidride carbonica e altri gas, assieme al vapore acqueo, lo immettono nuovamente in tutte le direzioni innalzando così la temperatura della superficie terrestre e dell'atmosfera. È grazie a questa specie di calotta che si crea un innalzamento della temperatura di $33\text{ }^\circ\text{C}$ che rende possibile una temperatura al suolo di $+15\text{ }^\circ\text{C}$. In questo senso, ma solo in questo e in virtù di un'analogia, si è soliti indicare il fenomeno naturale del riscaldamento dell'atmosfera e l'innalzamento della temperatura media a livello del suolo terrestre come effetto serra. L'analogia, evidentemente comoda dal punto di vista intuitivo, consiste appunto nel fatto che come la tecnica di coltivazione in serra modifica una situazione ambientale dal punto di vista microclimatico, così l'azione dell'anidride carbonica, in concomitanza con la radiazione termica riemessa dalla Terra nell'atmosfera, concorre a determinare una particolare situazione climatica del nostro pianeta.

3. Il clima

Il termine deriva dalla lingua greca (*klima*) e significa *inclinazione*; con esso, generalmente, viene tuttavia indicato l'insieme delle condizioni atmosferiche medie che, nel corso di un lungo periodo temporale, caratterizzano una qualsiasi regione geografica, ad esempio quella equatoriale, ma la sua considerazione può essere estesa all'intero pianeta Terra.

La climatologia è la scienza che studia il clima, uno studio che, è opportuno precisarlo, differisce sul piano del metodo da quello proprio della meteorologia, della quale peraltro si avvale. Se la climatologia analizza l'andamento stagionale e annuale di certi elementi quali la temperatura, l'umidità, le precipitazioni, la pressione atmosferica – e ne elabora i valori medi che sono considerati validi per ampie regioni nel lungo periodo –, le variazioni “qui e ora” di quelle grandezze adeguatamente rilevate con gli strumenti sono oggetto della meteorologia. La paleoclimatologia, infine, non è che l'indagine delle condizioni climatiche che si sono verificate nell'arco delle passate ere geologiche. La Terra, in effetti, ha conosciuto diversi climi nella sua storia passata. Nel corso del Pleistocene, il primo dei due periodi del Quaternario, cioè da circa 1,6 milioni di anni or sono a circa 10.000 anni fa, il clima terrestre ha subito diverse instabilità che hanno provocato l'alternarsi di periodi glaciali e periodi interglaciali. I primi, cioè i periodi glaciali, sono caratterizzati da un repentino abbassamento della temperatura media e dall'espansione dei ghiacci; i secondi, i periodi interglaciali che si collocano tra una glaciazione e un'altra, registrano invece un generalizzato aumento della temperatura media col conseguente ritiro o arretramento delle masse ghiacciate e un cospicuo innalzamento del livello dei mari e degli oceani, prefigurando un clima che molto probabilmente si avvicina a quello attuale. L'Olocene, il secondo periodo del Quaternario che considera gli ultimi 10.000 anni della storia del nostro pianeta, compresa quella presente, è considerato da parte del mondo scientifico come un periodo interglaciale.

Il clima non dipende solo da fattori esterni, cioè dall'irraggiamento del Sole, dai moti terrestri e dalla loro interazione con l'atmosfera, ma anche da alcuni, fondamentali fattori interni. Oltre, naturalmente, al moto dell'aria nell'atmosfera, i principali agenti interni sono gli oceani, i ghiacciai e i vulcani, nonché l'orografia.

Le masse d'aria, soggette al riscaldamento in corrispondenza dell'equatore, tendono a sollevarsi e a riaffiorare, una volta raffreddate, all'altezza del suolo; ciò comporta, nella fascia equatoriale, condizioni di bassa pressione e, quasi sempre, cospicue precipitazioni. Nei periodi estivi, le masse di aria calda che si staccano dall'equatore si dispongono verso nord, nell'emisfero boreale, e verso sud, nell'emisfero australe. Nel momento in cui ricadono sui poli, queste masse d'aria originano alte pressioni e, raffreddandosi, creano

venti che, dai poli, si dirigono verso sud, dal Polo Nord, e verso nord, dal Polo Sud. La circolazione dell'aria è resa ancor più complessa per gli effetti provocati da una forza particolare, la forza di Coriolis. L'influenza di questa forza, prodotta dal moto di rotazione della Terra, tende a far deviare le masse d'aria verso destra, cioè in senso orario, nell'emisfero boreale e verso sinistra, cioè in senso antiorario, nell'emisfero australe. Nei due emisferi terrestri è poi presente una zona di alte pressioni subtropicali che creano correnti che spirano verso l'equatore originando gli alisei, venti che in regime costante soffiano da nordest nell'emisfero boreale e da sudest in quello australe.

Come l'aria, anche la massa d'acqua che costituisce gli oceani, il 70% dell'intera superficie terrestre, sposta il calore immagazzinato dal Sole nelle diverse regioni del pianeta e, in particolare, dai tropici alle zone polari: spostamento che tende a ridurre i dislivelli di temperatura nelle diverse zone della Terra attraverso le correnti oceaniche. Le più importanti correnti oceaniche, tanto quelle fredde quanto quelle calde, come la corrente che dal Golfo del Messico attraversa l'Oceano Atlantico in direzione nordest mitigando il clima del settentrione europeo, sono l'effetto di venti persistenti e delle differenze di temperatura e di salinità dell'acqua.

I ghiacciai coprono attualmente il 10% delle terre emerse e svolgono, assieme alle superfici innevate, un fondamentale ruolo nei riguardi del clima. Tanto il ghiaccio quanto la neve, infatti, riflettono quasi specularmente le radiazioni solari e contribuiscono a creare zone di aria fredda.

Anche l'attività vulcanica ha un ruolo particolarmente rilevante nello stato del clima, dal momento che si pone come agente di raffreddamento della temperatura del pianeta: i gas (in particolare l'anidride solforosa), le ceneri e il pulviscolo che raggiungono gli strati alti dell'atmosfera formano un ostacolo per le radiazioni solari.

4. I cosiddetti gas “serra”

Senza la presenza di una certa quantità di anidride carbonica (CO_2), tale da garantire l'effetto di assorbimento e di rilascio della radiazione termica, non ci sarebbe vita sul pianeta. Tuttavia, se questa quantità supera i limiti che regolano la temperatura al suolo, il fenomeno può essere così pronunciato da assumere proporzioni tali da portare il calore superficiale su valori che, allo stesso modo,

venti che, dai poli, si dirigono verso sud, dal Polo Nord, e verso nord, dal Polo Sud. La circolazione dell'aria è resa ancor più complessa per gli effetti provocati da una forza particolare, la forza di Coriolis. L'influenza di questa forza, prodotta dal moto di rotazione della Terra, tende a far deviare le masse d'aria verso destra, cioè in senso orario, nell'emisfero boreale e verso sinistra, cioè in senso antiorario, nell'emisfero australe. Nei due emisferi terrestri è poi presente una zona di alte pressioni subtropicali che creano correnti che spirano verso l'equatore originando gli alisei, venti che in regime costante soffiano da nordest nell'emisfero boreale e da sudest in quello australe.

Come l'aria, anche la massa d'acqua che costituisce gli oceani, il 70% dell'intera superficie terrestre, sposta il calore immagazzinato dal Sole nelle diverse regioni del pianeta e, in particolare, dai tropici alle zone polari: spostamento che tende a ridurre i dislivelli di temperatura nelle diverse zone della Terra attraverso le correnti oceaniche. Le più importanti correnti oceaniche, tanto quelle fredde quanto quelle calde, come la corrente che dal Golfo del Messico attraversa l'Oceano Atlantico in direzione nordest mitigando il clima del settentrione europeo, sono l'effetto di venti persistenti e delle differenze di temperatura e di salinità dell'acqua.

I ghiacciai coprono attualmente il 10% delle terre emerse e svolgono, assieme alle superfici innevate, un fondamentale ruolo nei riguardi del clima. Tanto il ghiaccio quanto la neve, infatti, riflettono quasi specularmente le radiazioni solari e contribuiscono a creare zone di aria fredda.

Anche l'attività vulcanica ha un ruolo particolarmente rilevante nello stato del clima, dal momento che si pone come agente di raffreddamento della temperatura del pianeta: i gas (in particolare l'anidride solforosa), le ceneri e il pulviscolo che raggiungono gli strati alti dell'atmosfera formano un ostacolo per le radiazioni solari.

4. I cosiddetti gas “serra”

Senza la presenza di una certa quantità di anidride carbonica (CO₂), tale da garantire l'effetto di assorbimento e di rilascio della radiazione termica, non ci sarebbe vita sul pianeta. Tuttavia, se questa quantità supera i limiti che regolano la temperatura al suolo, il fenomeno può essere così pronunciato da assumere proporzioni tali da portare il calore superficiale su valori che, allo stesso modo,

renderebbero di fatto impossibile la sopravvivenza. Così, come appare evidente, il problema con cui fare i conti non è tanto la presenza di determinati gas nell'atmosfera – in primo luogo, l'anidride carbonica – ma il dato, foriero di dovuta preoccupazione se dovesse essere riconosciuto come inequivocabile, che la loro quantità sembra essere in aumento.

La prima cosa da fare consiste nell'individuare gli agenti potenzialmente devastanti. In tal senso, è opportuno compiere una distinzione preliminare: quella tra emissioni e concentrazioni di un determinato gas o sostanza; ciò ci consentirà non solo di offrirne un elenco, ma anche di stabilire se la loro emissione e il loro accumulo deve o meno essere messo in conto al fattore antropico, ovvero alla presenza e all'attività dell'uomo.

In termini il più possibile sintetici, diremo che le *emissioni* di uno o più gas sono una specie di flusso, che può essere continuo ma anche discontinuo, mentre le *concentrazioni* consistono in un accumulo di quantitativi delle medesime sostanze, che è suscettibile di crescita ma anche di diminuzione per le caratteristiche proprie di tali sostanze, a partire dal tempo del loro decadimento. In tal senso, con la nozione di *persistenza* indicheremo il periodo medio nel corso del quale un determinato gas è presente e rimane tale nell'atmosfera. Il fatto che i gas siano non solo diversi tra loro nel senso della specifica caratteristica di trattenere l'energia che dalla Terra si dirige nell'atmosfera, ma che la loro diversità investa anche il loro potere di decadimento, complica indubbiamente il tentativo di una loro identificazione sul piano della loro attitudine a produrre un effetto "serra", indicato come il loro potenziale di riscaldamento globale, *Global Warming Potential* (Gwp).

Per superare la difficoltà, si è considerata l'anidride carbonica (CO₂) come gas di riferimento, quello sui cui valori vengono di volta in volta ordinati gli altri gas, tenendo conto proprio del loro periodo di permanenza nell'atmosfera e del loro potere di assorbimento. Il Gwp è, insomma, una specie di unità di misura. L'arco di tempo convenzionalmente scelto per la valutazione del Gwp di un determinato gas è cento anni. Così, se nel corso di un secolo il Gwp del protossido di azoto (N₂O) è x , significa che gli effetti in termini di riscaldamento globale considerati cumulativamente per cento anni di una molecola di protossido di azoto emesso saranno x volte maggiori di una corrispondente unità di anidride carbonica.

I principali gas a effetto “serra” sono quattro:

- esafluoruro di zolfo (SF_6);
- protossido di azoto (N_2O);
- metano (CH_4);
- anidride carbonica (CO_2).

a) L'esafluoruro di zolfo

L'esafluoruro di zolfo è un gas che viene utilizzato tanto nel settore dell'industria elettrica, come isolante, quanto in quello delle fonderie di magnesio. Non esistono valutazioni di una certa attendibilità sulle quote di emissione. Benché le quantità in gioco siano piccole, occorre considerare che la persistenza di questo gas in atmosfera è di circa 3200 anni e il suo Gwp è pari a 23.900, un valore non trascurabile.

b) Il protossido di azoto

Il protossido di azoto è un gas composto di azoto e ossigeno, scarsamente concentrato nell'atmosfera; tuttavia, la sua persistenza è di circa 120 anni e, cosa da non trascurare, la sua efficacia dal punto di vista dell'effetto “serra” è almeno duecento volte quella dell'anidride carbonica. Le principali attività legate alla produzione di questo gas fanno capo all'agricoltura, in particolare con l'uso di fertilizzanti azotati, per una quota di certo non inferiore a 8 milioni di tonnellate all'anno che, ovviamente, vanno ad aggiungersi ai quantitativi assai più cospicui, ma non ancora ben determinati, di origine naturale. L'assorbimento di questo gas è principalmente a carico delle masse oceaniche.

c) Il metano

Il metano lega le proprie emissioni naturali alle mangrovie e alle paludi, nel senso che risulta come il prodotto della decomposizione e fermentazione, in ambiente privo di ossigeno, di materiale organico. I settori che ne determinano l'emissione assai elevata, fino a 371 milioni di tonnellate annue, da attribuire all'attività umana sono almeno quattro. Anzitutto, l'ambito della produzione del gas naturale, dove si verificano significative perdite sia in sede di perforazione sia di produzione, che vanno ad aggiungersi a quelle connesse con l'estrazione del petrolio greggio; in secondo luogo, il settore dell'estrazione del carbone; in terzo luogo, parte delle emissioni sono dovute all'allevamento zootecnico; infine, le discariche di rifiuti.

d) *L'anidride carbonica*

L'anidride carbonica o, meglio, il carbonio, viene rilasciato dagli ecosistemi attraverso la respirazione delle piante e degli animali. Sul versante delle concentrazioni, il carbonio è cumulato nell'atmosfera terrestre, nella biosfera, negli oceani, dove si diffonde semplicemente e viene convertito in diversi modi, infine nei sedimenti, dal momento che il carbonio si fissa sulle rocce. In assenza di attività antropica, tanto carbonio viene emesso, tanto ne viene assorbito nel breve periodo. La situazione cambia allorché si prendono in considerazione gli svariati ambiti nei quali si esercita l'opera dell'uomo giacché, in questo caso, si è in presenza di valori che tendono a crescere. Le concentrazioni di anidride carbonica sono cresciute in media dello 0,4% all'anno dal Settecento, con punte di 0,6% negli ultimi dieci anni. Poco importa, d'altronde, che le emissioni legate all'opera dell'uomo siano notevolmente inferiori a quelle del ciclo naturale: esse sono comunque sufficienti a destabilizzare il sistema e a provocare un incremento delle concentrazioni. Su questo punto non vi è il minimo dubbio, così come è fuori discussione che la temperatura media del pianeta stia aumentando.

5. Energia e ambiente

Se ci si chiede quali sono le attività umane in grado di condizionare in modo preoccupante il sistema di equilibrio termico del pianeta, non c'è dubbio che la risposta comprenda, anzitutto, le attività legate all'emissione di gas "serra" e, in secondo luogo, la sistematica opera di impoverimento dei serbatoi, dei magazzini naturali degli stessi gas, in particolare di quelli che consentono l'assorbimento dell'anidride carbonica. Le attività direttamente legate all'emissione di gas "serra" derivano essenzialmente dal consumo dei combustibili fossili, ovvero la produzione dell'energia e il suo sfruttamento, cui si aggiungono alcune produzioni di carattere industriale e agricolo. Occorre tuttavia prendere in seria considerazione che i modi attraverso i quali l'energia viene prodotta provoca conseguenze diverse in relazione alle fonti energetiche che vengono utilizzate per produrla. I combustibili fossili, ammesso e non concesso che il loro grado di purezza sia ottimale, producono *fisiologicamente* anidride carbonica e acqua. Detto in altri termini, quando c'è combustione si ha inevitabilmente produzione ed emissione di anidride carbonica. Per ogni unità di anidride carbonica prodotta dal carbone, il petrolio

d) *L'anidride carbonica*

L'anidride carbonica o, meglio, il carbonio, viene rilasciato dagli ecosistemi attraverso la respirazione delle piante e degli animali. Sul versante delle concentrazioni, il carbonio è cumulato nell'atmosfera terrestre, nella biosfera, negli oceani, dove si diffonde semplicemente e viene convertito in diversi modi, infine nei sedimenti, dal momento che il carbonio si fissa sulle rocce. In assenza di attività antropica, tanto carbonio viene emesso, tanto ne viene assorbito nel breve periodo. La situazione cambia allorché si prendono in considerazione gli svariati ambiti nei quali si esercita l'opera dell'uomo giacché, in questo caso, si è in presenza di valori che tendono a crescere. Le concentrazioni di anidride carbonica sono cresciute in media dello 0,4% all'anno dal Settecento, con punte di 0,6% negli ultimi dieci anni. Poco importa, d'altronde, che le emissioni legate all'opera dell'uomo siano notevolmente inferiori a quelle del ciclo naturale: esse sono comunque sufficienti a destabilizzare il sistema e a provocare un incremento delle concentrazioni. Su questo punto non vi è il minimo dubbio, così come è fuori discussione che la temperatura media del pianeta stia aumentando.

5. Energia e ambiente

Se ci si chiede quali sono le attività umane in grado di condizionare in modo preoccupante il sistema di equilibrio termico del pianeta, non c'è dubbio che la risposta comprenda, anzitutto, le attività legate all'emissione di gas "serra" e, in secondo luogo, la sistematica opera di impoverimento dei serbatoi, dei magazzini naturali degli stessi gas, in particolare di quelli che consentono l'assorbimento dell'anidride carbonica. Le attività direttamente legate all'emissione di gas "serra" derivano essenzialmente dal consumo dei combustibili fossili, ovvero la produzione dell'energia e il suo sfruttamento, cui si aggiungono alcune produzioni di carattere industriale e agricolo. Occorre tuttavia prendere in seria considerazione che i modi attraverso i quali l'energia viene prodotta provoca conseguenze diverse in relazione alle fonti energetiche che vengono utilizzate per produrla. I combustibili fossili, ammesso e non concesso che il loro grado di purezza sia ottimale, producono *fisiologicamente* anidride carbonica e acqua. Detto in altri termini, quando c'è combustione si ha inevitabilmente produzione ed emissione di anidride carbonica. Per ogni unità di anidride carbonica prodotta dal carbone, il petrolio

e il metano o il gas naturale ne producono circa due terzi. Ciò avviene:

- nel passaggio dall'energia primaria all'energia secondaria, cioè la produzione di elettricità;
- nel settore della trazione, cioè dell'energia disponibile per la mobilità e i trasporti;
- nella produzione di calore per uso industriale o per riscaldamento domestico.

Per motivi di coerenza e di completezza, dobbiamo a questo punto osservare che, in primo luogo, nei combustibili fossili sono di fatto presenti impurità che possono restare tali, o subire alterazioni, una volta avvenuta la combustione; in secondo luogo, che la combustione in aria porta i componenti dei combustibili a temperature molto elevate, con la conseguente produzione di ossidi di azoto. Distingueremo così, da un lato, le sostanze presenti nei combustibili *prima* della combustione che danno luogo a veleni *dopo* la combustione (tra queste trovano posto anche quelle sostanze che restano inalterate), dall'altro lato, le sostanze tossiche e velenose *create* dalla combustione.

Alla prima categoria di sostanze appartiene lo zolfo (S), anch'esso un combustibile. Reagendo con l'ossigeno, lo zolfo produce anidride solforosa (SO_2), da cui l'anidride solforica (SO_3) e l'acido solforico (H_2SO_4). Lo zolfo è presente nel carbone con una percentuale variabile tra lo 0,3% e il 10% e nell'olio combustibile, residuo della distillazione del petrolio greggio. Nel gas naturale lo zolfo è talvolta presente sotto forma di acido solfidrico (H_2S).

I combustibili fossili solidi e liquidi presentano anche frazioni di materiale che sfuggono alla combustione e che si aggiungono alla esigua quota di combustibile che non brucia; questo aspetto è particolarmente evidente per quanto riguarda il carbone, che presenta un contenuto di ceneri di circa il 10%, mentre la percentuale propria del petrolio è trascurabile. Senza parlare della benzina, che contiene una percentuale di piombo tetraetile, $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$. Parte di questo elemento velenoso che non partecipa alla combustione fuoriesce con i gas di scarico degli automezzi depositandosi al suolo. In ultimo non può essere trascurata la contaminazione radioattiva del carbone e del metano. Il carbone contiene uranio e torio (alcune parti per milione), che finiscono in isotopi del piombo, stabili e non radioattivi. In virtù del periodo di dimezzamento, l'attività radioattiva è modesta: U-238 ha un periodo di 4,5 miliardi di anni, U-235 di 0,7 miliardi di anni, il to-

rio di 14,5 miliardi di anni. Tuttavia, una tonnellata di carbone emette ogni secondo dalle 50.000 alle 70.000 particelle. In massima parte questa radioattività, nel caso di grandi impianti termoelettrici, è imprigionata nelle scorie di carbone e il residuo emesso nell'atmosfera; molto più alta è invece la radiazione rilasciata nel caso di combustione per usi domestici o in piccoli impianti di riscaldamento. Anche il metano presenta una leggera radioattività, associata alla presenza in esso, in percentuale variabile, del radon (Rn), un gas radioattivo.

Per quanto riguarda la seconda categoria di sostanze tossiche prodotte dalla combustione, cioè quelle non presenti nel combustibile ma create dalla stessa combustione, sono due gli agenti velenosi di cui non si può trascurare la pericolosità ambientale. Il primo agente è l'ossido di carbonio (CO), prodotto da una combustione incompleta, la cui emissione è dovuta in massima parte al settore della trazione e dei trasporti, cui va ad aggiungersi una modesta porzione da addebitare all'industria manifatturiera e alla vita domestica. Il secondo agente è costituito dagli ossidi di azoto. Anche in questo caso i mezzi di trasporto sono responsabili per almeno la metà delle emissioni in atmosfera, cui si somma una discreta percentuale da imputare alle centrali termoelettriche. La distruzione e, di conseguenza, l'impoverimento dei magazzini naturali di contenimento dei gas "serra" costituiscono il secondo motivo di preoccupazione per l'equilibrio termico della Terra. Ciò è dovuto, essenzialmente, alla distruzione diretta e indiretta delle aree boschive, delle foreste che godono della proprietà di assorbire anidride carbonica. In modo diretto, le foreste vengono distrutte sia per motivi legati alla produzione di energia sia per strategie di sviluppo agricolo, dal momento che la deforestazione consente un diverso uso e destinazione dei territori. Indirettamente, le aree boschive sono costantemente minacciate da fenomeni legati all'inquinamento provocato, per la maggior parte, dalle sostanze tossiche emesse nell'atmosfera (da cui le piogge acide), a partire da quegli agenti che, pur non essendo potenzialmente influenti sull'aumento della temperatura, sono comunque legati alla combustione.

6. Che cosa ci dovremo aspettare?

Fare previsioni sul futuro climatico del pianeta Terra non è impresa da poco. La sfida è appena iniziata e, come tale, necessita di continue modifiche e aggiustamenti a partire da una consapevolezza di fondo: l'impossibilità, almeno allo stato attuale, di giungere a formula-

rio di 14,5 miliardi di anni. Tuttavia, una tonnellata di carbone emette ogni secondo dalle 50.000 alle 70.000 particelle. In massima parte questa radioattività, nel caso di grandi impianti termoelettrici, è imprigionata nelle scorie di carbone e il residuo emesso nell'atmosfera; molto più alta è invece la radiazione rilasciata nel caso di combustione per usi domestici o in piccoli impianti di riscaldamento. Anche il metano presenta una leggera radioattività, associata alla presenza in esso, in percentuale variabile, del radon (Rn), un gas radioattivo.

Per quanto riguarda la seconda categoria di sostanze tossiche prodotte dalla combustione, cioè quelle non presenti nel combustibile ma create dalla stessa combustione, sono due gli agenti velenosi di cui non si può trascurare la pericolosità ambientale. Il primo agente è l'ossido di carbonio (CO), prodotto da una combustione incompleta, la cui emissione è dovuta in massima parte al settore della trazione e dei trasporti, cui va ad aggiungersi una modesta porzione da addebitare all'industria manifatturiera e alla vita domestica. Il secondo agente è costituito dagli ossidi di azoto. Anche in questo caso i mezzi di trasporto sono responsabili per almeno la metà delle emissioni in atmosfera, cui si somma una discreta percentuale da imputare alle centrali termoelettriche. La distruzione e, di conseguenza, l'impoverimento dei magazzini naturali di contenimento dei gas "serra" costituiscono il secondo motivo di preoccupazione per l'equilibrio termico della Terra. Ciò è dovuto, essenzialmente, alla distruzione diretta e indiretta delle aree boschive, delle foreste che godono della proprietà di assorbire anidride carbonica. In modo diretto, le foreste vengono distrutte sia per motivi legati alla produzione di energia sia per strategie di sviluppo agricolo, dal momento che la deforestazione consente un diverso uso e destinazione dei territori. Indirettamente, le aree boschive sono costantemente minacciate da fenomeni legati all'inquinamento provocato, per la maggior parte, dalle sostanze tossiche emesse nell'atmosfera (da cui le piogge acide), a partire da quegli agenti che, pur non essendo potenzialmente influenti sull'aumento della temperatura, sono comunque legati alla combustione.

6. Che cosa ci dovremo aspettare?

Fare previsioni sul futuro climatico del pianeta Terra non è impresa da poco. La sfida è appena iniziata e, come tale, necessita di continue modifiche e aggiustamenti a partire da una consapevolezza di fondo: l'impossibilità, almeno allo stato attuale, di giungere a formula-

re risposte certe e definitive. Chiunque, del resto, si rende perfettamente conto che la stessa “banale” previsione meteorologica, ben più limitata e ristretta, se offre dati attendibili non può comunque garantire che il concreto sviluppo degli eventi atmosferici si verifichi come annunciato. I fattori che entrano in gioco, le cosiddette variabili di cui tener conto, sono tali e complesse, specie per quanto riguarda la loro reciproca interazione, da lasciare ampi margini di incertezza. Questa incertezza va a scapito della precisione delle eventuali previsioni.

In linea generale, prevedere l'aumento medio della temperatura, più o meno marcato in relazione alle concentrazioni dei gas “serra”, sembra una partita che è possibile giocare assumendo come riferimento necessario gli effetti che l'incremento termico provoca sui fenomeni elementari. È tuttavia doveroso precisare che non c'è unanimità nel mondo scientifico nell'accettare una relazione lineare, di causa ed effetto, tra aumento della temperatura e concentrazioni. Ciò non toglie che tanto in sede nazionale, cioè dei singoli Paesi, quanto in ambito internazionale, si siano compiuti, e si stiano attualmente compiendo, gli sforzi necessari per giungere a formulare degli scenari il più possibile realistici, tali cioè da poter costituire una base ragionevole per lo sviluppo di una serie di azioni preventive. In tal senso, nel 1988 due istituti dell'Organizzazione delle nazioni unite (Onu), il *World Meteorological Organization* (Wmo) e l'*United Nation Environment Programme* (Unep), hanno costituito un nuovo organismo, l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Ipcc) i cui ricercatori, a partire dal 1990, hanno elaborato ben tre fondamentali rapporti a proposito del cambiamento climatico. Gli ultimi risultati, che tengono tra l'altro presenti i dati relativi allo sviluppo economico e alla crescita demografica delle diverse nazioni della Terra, sono stati elaborati, con l'ausilio di modelli matematici particolarmente complessi noti come *General Circulation Models* (Gcm), attraverso potenti computer.

Sembra ormai assodato che le attività umane abbiano influito in passato, e continueranno a influire anche in futuro, sull'aumento delle concentrazioni di anidride carbonica nell'atmosfera. Ciò si rifletterà sulla temperatura, che aumenterà.

Nel secolo appena trascorso, l'incremento termico è stato calcolato intorno a 0,6 °C, ed è probabile che il fenomeno sia stato provocato, se non interamente almeno in parte, dall'effetto “serra” originato dall'impatto che le attività tecnologiche umane hanno provocato sull'ambiente. Si badi bene: il dato appena riportato non vuol dire

che, attualmente, le temperature rilevate sono tutte più elevate di oltre mezzo grado centigrado. In realtà, a subire un incremento sono state soprattutto le temperature minime, quelle cioè registrate di notte. L'aumento sul piano globale delle temperature minime rispetto alle temperature massime, registrate di giorno, è confermato tanto nell'emisfero boreale che in quello australe e per le rispettive stagioni. Nel periodo compreso tra il 1950 e il 1993, le temperature diurne hanno registrato una tendenza alla crescita di $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni dieci anni, mentre le temperature notturne sono cresciute di $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il riscaldamento si è rivelato maggiore nella stagione invernale e nelle aree più fredde quali, ad esempio, la Siberia e le regioni nordoccidentali dell'America settentrionale.

Ora, non c'è dubbio che un riscaldamento che interessi i periodi freddi, nel caso in cui non aumentino anche temperature massime, è preferibile a un innalzamento termico che si verifichi nei periodi caldi; può risultare persino auspicabile, perché può significare una maggiore produzione agricola. Ma è altrettanto certo che se i valori minimi continueranno a crescere, ciò investirà inevitabilmente anche i valori massimi. Quanto consistente sarà l'aumento termico che ci dovremo attendere di qui al 2100 è un dato che, purtroppo, sfugge alle odierne capacità di previsione. L'inadeguatezza delle simulazioni elaborate, che stimano un incremento che oscilla tra $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, non consente di avere certezze. Peraltro, l'innalzamento della temperatura non sarà uniformemente esteso e, nel computo, dovranno essere tenute in debita considerazione le emissioni sul piano locale di composti, come l'anidride solforosa (SO_2), che tendono a raffreddare l'atmosfera, e l'azione degli aerosol.

Il calore, come sappiamo, favorisce l'evaporazione dell'acqua. Sul piano dei fenomeni elementari l'innalzamento termico è così associato all'aumento delle precipitazioni atmosferiche. Di per sé, anche in questo caso, l'incremento della piovosità può non costituire un problema. Tuttavia, un impulso che dovesse prolungarsi nel tempo e con decisa intensità potrebbe accrescere il rischio di inondazioni. Ciò non vuol dire che si dovrà far fronte con maggiore frequenza a tempeste e uragani: insomma, a condizioni climatiche estreme. Non solo non ci sono prove decisive che, nel corso del XX secolo, eventi di questo genere si siano moltiplicati, ma le stesse tempeste tropicali ed extratropicali subiscono variazioni multidecennali o anche tra un decennio e un altro, sicché non si registrano in modo evidente tendenze a lungo termine. Su questo punto è poi importante

mettere in chiaro che il principale fattore potenzialmente responsabile di eventi catastrofici di questo tipo è, in realtà, la pianificazione del territorio, ovvero la conservazione delle aree palustri che rallentano le piene, il controllo dei deflussi, la manutenzione dei corsi d'acqua e degli invasi. Contrariamente a quanto ci si potrebbe invece attendere, l'aumento delle precipitazioni non attenuerà il fenomeno della siccità: al contrario, in alcune aree e in determinate stagioni, la siccità è destinata ad aumentare.

Il cambiamento climatico provocherà anche un innalzamento dei mari. Nell'ultimo secolo, il livello delle acque salate si è alzato su scala planetaria di una quota compresa tra i 10 e i 25 centimetri. Per i prossimi cento anni, si prevede un innalzamento compreso tra i 31 e i 49 centimetri. L'espansione fisica degli oceani e dei mari è dovuta essenzialmente all'incremento della temperatura, alla maggiore quantità di acqua dolce che dalle montagne fluisce verso il mare, e che comprende anche una quantità relativa al ritiro dei ghiacciai. Non si può invece affermare niente di significativo e di attendibile sul comportamento che, nella circostanza, assumerà la calotta polare artica.

Non sono infine disponibili modelli o dati in grado di poter rilevare una stretta correlazione tra il riscaldamento globale e l'intensificazione di eventi meteorologici come quello denominato *El Niño* (il bambino, in lingua spagnola), correlazione peraltro seriamente messa in dubbio da consistenti ricerche di carattere storico. Il fenomeno, giunto all'attenzione generale nel 1982 e, in seguito, nel 1997, si presenta con andamento ciclico ogni tre o cinque anni negli ultimi cinquemila anni, e consiste in un riscaldamento delle acque dell'Oceano Pacifico a causa di un anomalo comportamento degli alisei. Normalmente, gli alisei spirano da est verso ovest spingendo nella stessa direzione l'acqua tiepida di superficie dell'oceano. Questo movimento richiama, per converso, le acque profonde e fredde delle coste occidentali dell'America centromeridionale. Nei mesi invernali gli alisei si indeboliscono, l'acqua fredda che sale in superficie diminuisce e aumenta la temperatura media delle acque superficiali condizionando il clima e dando luogo a intense precipitazioni atmosferiche.

IL DILEMMA NUCLEARE

1. Che cos'è una centrale nucleare

Si tratta di un impianto complesso, costruito con tecnologie altamente sofisticate dove si produce energia elettrica a uso civile e commerciale, che può essere finalizzato al reperimento di materiale nucleare per la costruzione di armi di distruzione di massa o per scopi di ricerca scientifica. Una centrale nucleare convenzionale, brucia uranio e produce elettricità, per questo motivo è più opportuno parlare di centrale o impianto elettronucleare. Attualmente sono in attività ben 441 impianti con diverse caratteristiche che, nel complesso, erogano circa il 16% di tutta l'energia elettrica consumata sull'intero pianeta, una quota certamente considerevole.

Una centrale elettronucleare prevede diversi ambienti: quello dove avviene la reazione controllata dell'energia, quello che ospita le turbine, l'ambiente del trasformatore ecc. Il suo centro vitale è tuttavia il reattore, che può essere concepito per la fissione di nuclei atomici di un elemento pesante come l'uranio (U) o per la fusione di nuclei atomici di elementi leggeri come il deuterio (D) e il trizio (T). I reattori per la fissione nucleare sono stati sviluppati sessantadue anni fa a partire dal modello messo a punto dal fisico italiano Enrico Fermi (1901-1954), con la realizzazione della prima reazione a catena di fissione nucleare in grado di autosostenersi. La realizzazione di reattori per la fusione nucleare controllata è ancora oggetto di studio e ricerca che, in un futuro non troppo lontano, si spera possa offrire positivi risultati sperimentali.

I principali componenti di un reattore di fissione sono:

- il combustibile;
- il moderatore e la sua collocazione;
- il sistema di raffreddamento;
- i dispositivi di controllo e di misura, sistemi di schermatura e di emergenza.

Il *combustibile* e il *moderatore* formano il cosiddetto *nocciolo* del reattore, dove ha fisicamente luogo il processo di reazione; il sistema di raffreddamento, che circonda il nocciolo del reattore, trasporta il calore sprigionato nella fissione che, una volta convertito in vapore, aziona la turbina. L'intero processo è controllato, nei parametri fondamentali, da diversi strumenti di misurazione.

Il combustibile è costituito dall'uranio (U) o dal torio (Th), presenti in natura, e dal plutonio (Pu), sottoprodotto della stessa fissione nucleare. Prima di poter essere effettivamente utilizzato, l'uranio naturale, così come il torio e il plutonio, devono sostenere diversi processi. Le fasi in cui si articola questo percorso, assieme alle ulteriori tappe che portano alla produzione dell'energia nucleare e al ricambio o al riprocessamento del combustibile, ne disegnano il ciclo, che può essere aperto o chiuso.

a) *Il ciclo aperto del combustibile*

Una volta estratto dai giacimenti, l'uranio naturale viene frantumato e compattato per essere poi trasferito in un impianto in grado di convertirlo in esafluoruro di uranio (UF_6) gassoso. Ottenuta la conversione, la tappa successiva è quella dell'arricchimento. Il gas di esafluoruro di uranio (UF_6) viene spinto forzatamente contro una barriera formata da una struttura particolare, cioè realizzata in modo da consentire la penetrazione dell'isotopo U-235 fissile, ma presente con ridotta percentuale nell'uranio naturale, separandolo dall'isotopo U-238, *fertile*. Ciò è possibile perché, pur avendo lo stesso numero atomico, il peso dei due isotopi è diverso: U-238 è più pesante di U-235. Il gas, arricchito dalla concentrazione di U-235, prosegue il cammino verso un nuovo impianto dove viene trasformato in polvere di biossido di uranio (UO_2) dalla quale si ottengono i costituenti fondamentali, le *pastiglie*, che formano le barre di combustibile. Queste ultime, raggruppate in elementi che normalmente ammontano a circa 200 unità, vengono infine disposte nel reattore, pronte a svolgere la loro funzione. In generale, gli odierni reattori devono essere riforniti ogni anno per circa un terzo di nuovo materiale combustibile. Ciò è dovuto in gran parte all'esaurimento di U-235 oltre che all'accumulo di diversi prodotti di fissione. Il combustibile esausto viene così prelevato e stipato in contenitori metallici pressurizzati per trenta giorni per poi essere immerso in vasche di raffreddamento e custodito per almeno un anno. Al termine del periodo temporale stabilito il materiale viene collocato in appositi fusti schermati e predisposto in depositi definitivi.

Il ciclo *aperto* del combustibile nucleare è senza dubbio vantaggioso sul piano della sicurezza, dal momento che evita una serie di passaggi dove si ha a che fare con il plutonio che, come noto, ha un uso spiccatamente bellico. Il percorso tratteggiato presenta tuttavia un significativo svantaggio sul piano dell'efficienza perché del combustibile a disposizione viene utilizzata una quota relativa al solo 1% del suo contenuto energetico. Tutto il resto va nelle scorie.

b) Il ciclo chiuso del combustibile

Si tratta di un percorso complesso. Anzitutto, già nella fase in cui il combustibile viene convertito in esafluoruro di uranio (UF_6) si procede anche alla produzione di ossidi misti; poi, una volta bruciato e temporaneamente stoccato, il materiale esausto subisce un processo di riciclaggio in impianti di riprocessamento chimico. In questa fase l'uranio viene separato dal plutonio e da altre componenti presenti nelle scorie per essere pienamente recuperato e predisposto per un nuovo utilizzo. Le scorie ad alto livello radioattivo vengono trattate secondo particolari procedimenti e, come il materiale esausto, disposte in siti definitivi.

Il ciclo *chiuso* del combustibile nucleare permette un'utilizzazione altamente efficiente del materiale, basti pensare che tanto l'U-238 riciclato, quanto l'uranio impoverito, residuale in seguito al processo di arricchimento, assieme al plutonio delle barre utilizzate, alimentano gli impianti finalizzati alla formazione definitiva del combustibile. Il recupero e il riciclaggio dell'intera produzione di plutonio evita il ricorso allo sfruttamento delle riserve di uranio naturale e, nel caso dei processi autofertilizzanti, dove la quantità di plutonio prodotta è maggiore di quella dell'uranio bruciato per produrlo, il plutonio in eccesso viene accuratamente custodito in depositi in vista della sua utilizzazione in altri processi di fissione.

c) Il moderatore

Se ne è già parlato illustrando la reazione di fissione. In questa sede ci limiteremo opportunamente a precisare che il moderatore può assumere una diversa disposizione, ovvero essere estraneo o a contatto con il combustibile e, in certi casi, persino eliminato. Di qui, come vedremo, la diversa tipologia dei reattori a fissione nucleare.

Il terzo elemento costitutivo di un reattore a fissione nucleare è il sistema di raffreddamento. In genere, gli impianti attualmente in esercizio prevedono un sistema di refrigerazione strutturato in due

circuiti, il circuito primario e quello secondario. Il circuito primario trasporta il calore prodotto dalla reazione di fissione e lo congela verso uno scambiatore che lo trasferisce al circuito secondario; qui il calore viene trasformato in vapore che a sua volta mette in funzione le turbine per la generazione di energia elettrica. L'elemento che trasferisce il calore, e che circola nel sistema, è generalmente acqua naturale o, in particolari tipi di reattore, metallo fuso. Infine, per quanto riguarda i dispositivi di controllo, la potenza di un reattore di fissione in esercizio è costantemente monitorata attraverso la misurazione di parametri fondamentali quali la temperatura, il flusso termico, il livello di attività nucleare. L'attività radioattiva che si sprigiona dal reattore nel corso del processo di fissione e dai residui di fissione è assorbita da strutture di contenimento che circondano il reattore stesso e il circuito primario. Un'ulteriore protezione è costituita da un sistema autonomo di raffreddamento del nucleo, che interviene in caso di eventuale surriscaldamento del reattore non tamponato a causa di un'avarìa del sistema di refrigerazione principale. Una calotta esterna funge da struttura di contenimento in caso di perdite di materiale radioattivo.

2. Reattori termici e reattori veloci autofertilizzanti

Gli elementi in base ai quali si distinguono i diversi tipi di reattori a fissione nucleare sono tre: il combustibile utilizzato; il moderatore e la sua collocazione; il liquido o l'elemento che circola nel sistema di raffreddamento.

Nei suoi primi sviluppi, a partire dal 1950, la produzione dell'energia nucleare per fissione contempla sostanzialmente due modelli di reattori dettati dalla scelta del combustibile: l'uranio naturale. La necessità di un moderatore efficace, cioè poco incline alla cattura e all'assorbimento di neutroni di fronte a un combustibile con debole percentuale di U-235, l'isotopo propriamente fissile, impose da un lato la grafite, dall'altro l'acqua pesante ovvero l'ossido di deuterio (D_2O). I primi reattori a grafite o ad acqua pesante dovevano, dopo breve tempo, cedere il passo a reattori più avanzati, alimentati da uranio arricchito e raffreddati a gas.

Dopo il 1970, i reattori convenzionali, di carattere quasi esclusivamente commerciale, sono in genere reattori termici. Si tratta di reattori alimentati da uranio arricchito che utilizzano neutroni lenti, con il moderatore separato, cioè estraneo al combustibile, raf-

freddati ad acqua naturale, *Light Water Reactor* (Lwr), con potenza compresa tra i 700 e i 1300 Mw (megawatt).

I reattori a fissione raffreddati ad acqua naturale sono di due tipi:

- reattori ad acqua in pressione, *Pressurized Water Reactor* (Pwr);
- reattori ad acqua bollente, *Bowling Water Reactor* (Bwr).

Il reattore ad acqua in pressione (Pwr) è molto diffuso perché tecnologicamente semplice; non pone problemi di reperibilità né dei materiali né del combustibile (uranio arricchito), offrendo al contempo alte garanzie di sicurezza. L'acqua viene mantenuta a una pressione di 155 atmosfere per impedirne l'ebollizione, e assolve il compito di refrigerante e di liquido di funzionamento, cioè moderatore. Il nocciolo è formato da schiere di barre di combustibile rivestite di zirconio (Zr) e costituite da piccoli cilindri di biossido di uranio (UO_2) debolmente arricchito. L'elemento combustibile presenta una schiera standard di 17 per 17 barre: duecento di questi elementi formano il nocciolo del reattore, che misura 3,5 metri in altezza e 3,5 metri di diametro, ed è racchiuso da un recipiente in pressione con pareti di uno spessore di 15 o 20 centimetri. Il calore prodotto dalle reazioni di fissione viene rimosso dall'acqua messa in circolo. Pompato nel nocciolo, il refrigerante ha una temperatura di 290 °C, ma al momento della sua uscita la sua temperatura è di 325 °C. Il livello dell'energia è monitorato da barre di controllo costruite con materiale in grado di moderare le fissioni assorbendo i neutroni termici; il controllo avviene semplicemente: è sufficiente inserire o estrarre le barre incastrate nelle schiere di combustibile. Per bloccare la reazione a catena, sia per sostituire il combustibile sia in caso di incidente, basta abbassare tutte le barre di controllo nel nocciolo. Nel circuito di raffreddamento primario del reattore, l'acqua ad alta temperatura proveniente dal nocciolo passa da uno scambiatore che trasmette il calore a un circuito di vapore secondario a pressione inferiore. Il vapore prodotto si espande nella turbina che aziona il generatore di corrente elettrica. Il ciclo si chiude quando il vapore, condensato, è immerso nuovamente nello scambiatore. La condensazione del vapore è ottenuta attraverso l'acqua di un terzo circuito, completamente isolato dalla zona radioattiva, che viene refrigerato ad aria nelle grandi torri di raffreddamento, dalle quali esce solo vapore acqueo. L'acqua di questo terzo circuito viene prelevata da un fiume o un lago.

Nei reattori ad acqua bollente (Bwr), l'acqua raggiunge il punto di ebollizione nel nocciolo, a una pressione assai contenuta di 70 atmosfere, senza la necessità di ricorrere a uno scambiatore di calore intermedio. Il vapore prodotto viene inviato direttamente nella turbina, quindi condensato e nuovamente introdotto nel reattore. Anche in questo tipo di reattore, l'acqua di refrigerazione del condensatore proviene da una fonte completamente estranea alla zona contaminata dalle radiazioni.

A partire dal 1984, dopo decenni di ricerca e di sperimentazione, è entrato in esercizio un reattore di nuova concezione, a ragione denominato autofertilizzante. Si tratta del *Superphénix*, installato a Creys-Malville, in Francia.

Come è stato in precedenza sottolineato, questo tipo di reattore è in grado di produrre una quantità di combustibile maggiore rispetto a quella utilizzata per il proprio funzionamento. Le condizioni più favorevoli per raggiungere questo risultato si ottengono quando il plutonio fissile (Pu-239) e l'uranio fertile (U-238) sono usati insieme in un reattore a neutroni veloci, ovvero neutroni che non vengono rallentati da un moderatore nel periodo brevissimo di tempo compreso fra il momento in cui vengono emessi in seguito a una reazione di fissione e il momento in cui provocano la reazione successiva. Nel *Superphénix* il materiale fissile è una miscela combustibile con una media di 17% di biossido di plutonio (PuO_2) e 83% di biossido di uranio (UO_2), il materiale fertile è composto esclusivamente di biossido di uranio. In queste condizioni, il rapporto di rigenerazione può effettivamente superare anche notevolmente l'unità. La carica iniziale di Pu-239 serve per dare avvio alle reazioni di fissione a catena e alla produzione di energia. Durante questo periodo, il plutonio viene prodotto dall'uranio naturale o da U-235 nel nocciolo e nel mantello che lo circonda. Allorché i gruppi di elementi di combustibile che costituiscono il nocciolo e il mantello sono stati per lungo tempo sottoposti a radiazioni, devono essere ritrattati chimicamente per separare e asportare i diversi materiali di fissione. Orbene, in ogni nuovo trattamento viene recuperata una quantità di plutonio (Pu-239) maggiore rispetto a quella esistente all'inizio dell'irraggiamento. Il plutonio in eccesso viene custodito a parte e sostituito nel reattore con uranio naturale o impoverito.

L'utilizzazione di neutroni veloci, oltre a implicare l'assenza di un moderatore, comporta anche che le dimensioni del nocciolo del reattore siano assai compatte; in un impianto di 1000 MW di po-

tenza, il volume del nocciolo non supera i 10 m³. Per loro stessa natura, questo genere di reattori producono una grande quantità di calore per unità di volume. Per mitigare questa fortissima produzione di calore bisogna utilizzare un refrigerante dotato di notevoli proprietà termiche; tra gli elementi potenzialmente impiegabili, la scelta è caduta sul sodio (Na). Questo elemento metallico si presenta allo stato liquido a una temperatura di 98 °C e raggiunge l'ebollizione, a pressione atmosferica, a 882 °C. Nel nocciolo del reattore, la temperatura massima raggiunta dal sodio liquido non supera normalmente i 550 °C, il che comporta l'ulteriore vantaggio di evitare la pressurizzazione dei recipienti e dei circuiti che lo contengono. Infine, le eccellenti proprietà termiche del sodio fanno sì che il vapore abbia caratteristiche equivalenti a quelle richieste per azionare le turbine delle più moderne centrali termoelettriche alimentate da combustibile fossile.

3. I nodi da sciogliere

A fronte di un contributo che, sul piano delle grandi quantità di energia erogata, non può essere messo in discussione, giacché copre circa il 6% dell'energia mondiale prodotta in un anno, il futuro dell'energia nucleare da fissione pone inevitabilmente alcune questioni relative alla sicurezza, al trattamento dei rifiuti nucleari, al conseguimento di una completa efficienza, e, infine, alla sua convenienza economica.

La questione della sicurezza si pone sotto un duplice aspetto. Il primo è relativo al non perfetto funzionamento e, di conseguenza, all'efficacia dei sistemi di controllo e di emergenza, *interno* allo stesso processo di produzione dell'energia nucleare da fissione. Il secondo prende in considerazione situazioni di pericolosità e di rischio provenienti dall'*esterno*, dovute a eventi naturali o all'azione dell'uomo. Nel corso della sua storia, la tecnologia degli impianti nucleari ha dovuto far fronte a due soli incidenti, riconosciuti e classificati come tali. Il primo incidente, certamente serio e grave, ma positivamente risolto e ridimensionato proprio grazie ai sistemi posti a garanzia dell'impianto, si è verificato il 29 marzo 1979 nella centrale di Three Miles Island in Pennsylvania (Usa). L'impianto installava un reattore del tipo Pwr. Un errore commesso durante le operazioni di ordinaria manutenzione e il difettoso funzionamento di una valvola di controllo provocò una lieve perdita nel circuito di

raffreddamento. Il reattore si spense automaticamente come dovuto, mentre l'impianto ausiliario di emergenza entrò efficacemente in funzione come previsto. La quantità di radioattività fuoriuscita fu estremamente ridotta e senza effetti apprezzabili sull'ambiente e le popolazioni. Il secondo incidente, questo sì gravissimo, si è verificato il 26 aprile 1986 a Černobyl, località ai confini tra l'Ucraina e la Bielorussia, all'epoca due repubbliche dell'ex Unione Sovietica. Con i suoi quattro reattori, la centrale di Černobyl generava 4000 MW di elettricità. Sebbene costruito nel 1983, l'impianto sovietico era concepito con una tecnologia appartenente a modelli ormai obsoleti e superati. Non solo era sprovvisto di una cupola di contenimento, ma utilizzava la grafite come moderatore. In questo tipo di reattori, all'epoca vietati da oltre dieci anni in Europa occidentale, se la temperatura sale in modo incontrollato la grafite reagisce con l'acqua di raffreddamento. L'incidente fu dovuto esclusivamente al fattore umano e, precisamente, nel corso di un'esercitazione per lo studio di un sistema di sicurezza in condizioni critiche. Così, esclusi incredibilmente i sistemi automatici di spegnimento del nocciolo, il reattore fu portato volutamente a una potenza di molto inferiore a quella consigliata, condizione che, come era prevedibile, rese instabile il nocciolo e innescò una reazione a catena incontrollabile. La conseguenza fu l'esplosione del nocciolo del reattore numero 4, dell'edificio e della sala turbine; la grafite s'incendiò; una colonna di fumo, senza trovare ostacoli di sorta, si levò alta nel cielo e trasferì nell'atmosfera una quantità rilevante di elementi radioattivi e prodotti di fissione.

La dinamica dei due incidenti è di per sé eloquente: nel primo caso, tecnologie all'avanguardia anche sul piano della sicurezza hanno ridimensionato di molto la gravità e gli effetti di una eventuale contaminazione radioattiva; nel secondo caso, la catastrofe *non poteva non realizzarsi*, era inevitabile, benché i dati ormai accettati e accessibili ne offrano una rappresentazione molto meno apocalittica di quanto ci si aspettava in un primo momento. Ciò non toglie, ovviamente, che la ricerca di sistemi assolutamente sicuri non abbia continuato il proprio cammino, ad esempio predisponendo una doppia cupola di contenimento, e prospettando addirittura un modello di reattore a sicurezza intrinseca, cioè tale da poter operare solo sulla base di leggi naturali, minimizzando e, di fatto, rendendo ininfluente il fattore umano nei riguardi di due funzioni decisive quali lo

spegnimento o arresto della reazione a catena e la rimozione del calore residuo.

Dopo l'attentato dell'11 settembre 2001 alle Torri Gemelle di New York, nuove e legittime preoccupazioni si sono addensate nei riguardi di potenziali pericoli esterni, ai quali potrebbe esser sottoposto un impianto elettronucleare. Costruita in grado di poter far fronte a eventi naturali imprevisi, come terremoti devastanti o fenomeni atmosferici particolarmente disastrosi come gli uragani, una centrale nucleare non può più ignorare o classificare come remota la possibilità di un attentato terroristico. Le tecnologie per rendere ancor più sicuri gli edifici vitali e sensibili non mancano, così come le tecniche organizzative per una vigilanza affidabile anche su questo fronte.

La questione dei rifiuti nucleari si lega, da un certo punto di vista, a quella della sicurezza, dal momento che pone interrogativi circa l'impatto che gli eventuali depositi di stoccaggio (temporaneo o definitivo) possono avere sull'ambiente e sull'uomo nel medio e lungo periodo, nonché la loro vulnerabilità rispetto a tentativi di sabotaggio o di illecita appropriazione del materiale radioattivo.

I rifiuti di un impianto elettronucleare differiscono da quelli prodotti da una centrale a carbone per due aspetti fondamentali. In primo luogo, la quantità di rifiuti di origine nucleare è milioni di volte inferiore rispetto alla quantità di scorie prodotte dal carbone. In un anno di attività, un reattore di 1000 MW produce circa 2 m³ di scorie. In secondo luogo, benché modesto, il quantitativo del rifiuto nucleare costituisce di fatto un pericolo, dato il suo potenziale radioattivo.

Le scorie ad alto livello radioattivo generate dal processo di fissione nucleare provengono da due distinte fonti: quella commerciale per la produzione di energia elettrica, quella militare, per la produzione di plutonio (Pu-239), necessario per la produzione di ordigni bellici. La diversa origine del rifiuto nucleare implica una differenza del livello di attività radioattiva e la necessità di distinguere le scorie tanto sul piano della sicurezza a lungo termine, quanto sul piano del trattamento loro riservato. Le scorie provenienti da impianti commerciali sono costituite dal combustibile esausto che contiene significative percentuali di isotopi di uranio e di plutonio, zirconio (Zr), nettunio (Np-237), americio (Am-243), curio (Cm-244) e altri prodotti di fissione. Le scorie di provenienza militare sono di diversi tipi e comprendono anche il materiale esausto. La componente maggioritaria dei rifiuti nucleari è costituita dal residuo di riproces-

samento, dove prevalgono le quote di cesio (Cs-137) e di stronzio (Sr-90), con tempo di dimezzamento di circa trent'anni; infine di tecnezio (Tc-99), con un tempo di dimezzamento di 211.000 anni. Dopo esser stati riciclati, gli elementi combustibili sono disposti in contenitori e immagazzinati in depositi schermati e sorvegliati in vista di future destinazioni oppure vengono convertiti in composti stabili che ne riducono anche il volume, vetrificati e collocati in contenitori di acciaio inossidabile che saranno interrati in magazzini sotterranei.

La vetrificazione e l'interramento a opportune profondità in aree geologicamente idonee sono attualmente le uniche alternative percorribili. Il livello di sicurezza è affidabile, specie se si considera un fatto elementare troppe volte messo colpevolmente in ombra: il fatto che il fenomeno radioattivo non solo è maggiormente conosciuto, ma, rispetto alle reazioni di tipo chimico, è sostanzialmente controllabile attraverso strumenti di misura semplici e totalmente affidabili. Non è del resto un caso che lo sviluppo della ricerca medica in questo settore (medicina nucleare) si incrementi giorno dopo giorno con successi sempre più importanti e incoraggianti.

L'età media di un impianto nucleare è di venticinque anni. Dopo questo lasso di tempo, nel corso del quale la continua esposizione alle radiazioni ha inevitabilmente contaminato le strutture più esposte, la centrale deve essere smantellata a partire dagli ambienti più compromessi; un'operazione che pur essendo condotta in sicurezza si protrae per non meno di un decennio.

La questione della completa utilizzazione della fissione nucleare si decide interamente sulla scelta a favore di reattori di nuova concezione autofertilizzanti, con combustibile a base di torio, peraltro già sfruttato in reattori a neutroni lenti, e sulla possibilità di allungare notevolmente il periodo di attività degli impianti rispetto ai tempi attuali. Senza questa prospettiva strategica, anche in vista della realizzazione di processi di fusione controllata, continuando a bruciare uranio, sebbene in processi autofertilizzanti, si stima che le risorse disponibili per il futuro siano al massimo dieci volte maggiori di quelle consumate fino a oggi. Con l'impiego di reattori veloci e del torio, la disponibilità di combustibile diventerà praticamente illimitata. Tutto questo provocherà un abbassamento dei costi: ultima questione sulla quale, tuttavia, al momento non è possibile fornire dati affidabili. La scelta del torio ridimensiona infine le preoccupazioni di sicurezza relative alla produzione di plutonio.

Nel processo di autofertilizzazione con il torio si ottengono due risultati molto significativi: la quantità di plutonio contenuta nel combustibile esausto è notevolmente ridotta rispetto all'attuale quantitativo garantito dai reattori autofertilizzanti; il tipo di plutonio che se ne ricava presenta una esigua percentuale di Pu-238, altamente radioattivo e indispensabile, assieme a Pu-239, per gli scopi bellici.

IL DILEMMA NUCLEARE

1. Che cos'è una centrale nucleare

Si tratta di un impianto complesso, costruito con tecnologie altamente sofisticate dove si produce energia elettrica a uso civile e commerciale, che può essere finalizzato al reperimento di materiale nucleare per la costruzione di armi di distruzione di massa o per scopi di ricerca scientifica. Una centrale nucleare convenzionale, brucia uranio e produce elettricità, per questo motivo è più opportuno parlare di centrale o impianto elettronucleare. Attualmente sono in attività ben 441 impianti con diverse caratteristiche che, nel complesso, erogano circa il 16% di tutta l'energia elettrica consumata sull'intero pianeta, una quota certamente considerevole.

Una centrale elettronucleare prevede diversi ambienti: quello dove avviene la reazione controllata dell'energia, quello che ospita le turbine, l'ambiente del trasformatore ecc. Il suo centro vitale è tuttavia il reattore, che può essere concepito per la fissione di nuclei atomici di un elemento pesante come l'uranio (U) o per la fusione di nuclei atomici di elementi leggeri come il deuterio (D) e il trizio (T). I reattori per la fissione nucleare sono stati sviluppati sessantadue anni fa a partire dal modello messo a punto dal fisico italiano Enrico Fermi (1901-1954), con la realizzazione della prima reazione a catena di fissione nucleare in grado di autosostenersi. La realizzazione di reattori per la fusione nucleare controllata è ancora oggetto di studio e ricerca che, in un futuro non troppo lontano, si spera possa offrire positivi risultati sperimentali.

I principali componenti di un reattore di fissione sono:

- il combustibile;
- il moderatore e la sua collocazione;
- il sistema di raffreddamento;
- i dispositivi di controllo e di misura, sistemi di schermatura e di emergenza.

Il *combustibile* e il *moderatore* formano il cosiddetto *nocciolo* del reattore, dove ha fisicamente luogo il processo di reazione; il sistema di raffreddamento, che circonda il nocciolo del reattore, trasporta il calore sprigionato nella fissione che, una volta convertito in vapore, aziona la turbina. L'intero processo è controllato, nei parametri fondamentali, da diversi strumenti di misurazione.

Il combustibile è costituito dall'uranio (U) o dal torio (Th), presenti in natura, e dal plutonio (Pu), sottoprodotto della stessa fissione nucleare. Prima di poter essere effettivamente utilizzato, l'uranio naturale, così come il torio e il plutonio, devono sostenere diversi processi. Le fasi in cui si articola questo percorso, assieme alle ulteriori tappe che portano alla produzione dell'energia nucleare e al ricambio o al riprocessamento del combustibile, ne disegnano il ciclo, che può essere aperto o chiuso.

a) *Il ciclo aperto del combustibile*

Una volta estratto dai giacimenti, l'uranio naturale viene frantumato e compattato per essere poi trasferito in un impianto in grado di convertirlo in esafluoruro di uranio (UF_6) gassoso. Ottenuta la conversione, la tappa successiva è quella dell'arricchimento. Il gas di esafluoruro di uranio (UF_6) viene spinto forzatamente contro una barriera formata da una struttura particolare, cioè realizzata in modo da consentire la penetrazione dell'isotopo U-235 fissile, ma presente con ridotta percentuale nell'uranio naturale, separandolo dall'isotopo U-238, *fertile*. Ciò è possibile perché, pur avendo lo stesso numero atomico, il peso dei due isotopi è diverso: U-238 è più pesante di U-235. Il gas, arricchito dalla concentrazione di U-235, prosegue il cammino verso un nuovo impianto dove viene trasformato in polvere di biossido di uranio (UO_2) dalla quale si ottengono i costituenti fondamentali, le *pastiglie*, che formano le barre di combustibile. Queste ultime, raggruppate in elementi che normalmente ammontano a circa 200 unità, vengono infine disposte nel reattore, pronte a svolgere la loro funzione. In generale, gli odierni reattori devono essere riforniti ogni anno per circa un terzo di nuovo materiale combustibile. Ciò è dovuto in gran parte all'esaurimento di U-235 oltre che all'accumulo di diversi prodotti di fissione. Il combustibile esausto viene così prelevato e stipato in contenitori metallici pressurizzati per trenta giorni per poi essere immerso in vasche di raffreddamento e custodito per almeno un anno. Al termine del periodo temporale stabilito il materiale viene collocato in appositi fusti schermati e predisposto in depositi definitivi.

Il ciclo *aperto* del combustibile nucleare è senza dubbio vantaggioso sul piano della sicurezza, dal momento che evita una serie di passaggi dove si ha a che fare con il plutonio che, come noto, ha un uso spiccatamente bellico. Il percorso tratteggiato presenta tuttavia un significativo svantaggio sul piano dell'efficienza perché del combustibile a disposizione viene utilizzata una quota relativa al solo 1% del suo contenuto energetico. Tutto il resto va nelle scorie.

b) Il ciclo chiuso del combustibile

Si tratta di un percorso complesso. Anzitutto, già nella fase in cui il combustibile viene convertito in esafluoruro di uranio (UF_6) si procede anche alla produzione di ossidi misti; poi, una volta bruciato e temporaneamente stoccato, il materiale esausto subisce un processo di riciclaggio in impianti di riprocessamento chimico. In questa fase l'uranio viene separato dal plutonio e da altre componenti presenti nelle scorie per essere pienamente recuperato e predisposto per un nuovo utilizzo. Le scorie ad alto livello radioattivo vengono trattate secondo particolari procedimenti e, come il materiale esausto, disposte in siti definitivi.

Il ciclo *chiuso* del combustibile nucleare permette un'utilizzazione altamente efficiente del materiale, basti pensare che tanto l'U-238 riciclato, quanto l'uranio impoverito, residuale in seguito al processo di arricchimento, assieme al plutonio delle barre utilizzate, alimentano gli impianti finalizzati alla formazione definitiva del combustibile. Il recupero e il riciclaggio dell'intera produzione di plutonio evita il ricorso allo sfruttamento delle riserve di uranio naturale e, nel caso dei processi autofertilizzanti, dove la quantità di plutonio prodotta è maggiore di quella dell'uranio bruciato per produrlo, il plutonio in eccesso viene accuratamente custodito in depositi in vista della sua utilizzazione in altri processi di fissione.

c) Il moderatore

Se ne è già parlato illustrando la reazione di fissione. In questa sede ci limiteremo opportunamente a precisare che il moderatore può assumere una diversa disposizione, ovvero essere estraneo o a contatto con il combustibile e, in certi casi, persino eliminato. Di qui, come vedremo, la diversa tipologia dei reattori a fissione nucleare.

Il terzo elemento costitutivo di un reattore a fissione nucleare è il sistema di raffreddamento. In genere, gli impianti attualmente in esercizio prevedono un sistema di refrigerazione strutturato in due

circuiti, il circuito primario e quello secondario. Il circuito primario trasporta il calore prodotto dalla reazione di fissione e lo convoglia verso uno scambiatore che lo trasferisce al circuito secondario; qui il calore viene trasformato in vapore che a sua volta mette in funzione le turbine per la generazione di energia elettrica. L'elemento che trasferisce il calore, e che circola nel sistema, è generalmente acqua naturale o, in particolari tipi di reattore, metallo fuso. Infine, per quanto riguarda i dispositivi di controllo, la potenza di un reattore di fissione in esercizio è costantemente monitorata attraverso la misurazione di parametri fondamentali quali la temperatura, il flusso termico, il livello di attività nucleare. L'attività radioattiva che si sprigiona dal reattore nel corso del processo di fissione e dai residui di fissione è assorbita da strutture di contenimento che circondano il reattore stesso e il circuito primario. Un'ulteriore protezione è costituita da un sistema autonomo di raffreddamento del nucleo, che interviene in caso di eventuale surriscaldamento del reattore non tamponato a causa di un'avaria del sistema di refrigerazione principale. Una calotta esterna funge da struttura di contenimento in caso di perdite di materiale radioattivo.

2. Reattori termici e reattori veloci autofertilizzanti

Gli elementi in base ai quali si distinguono i diversi tipi di reattori a fissione nucleare sono tre: il combustibile utilizzato; il moderatore e la sua collocazione; il liquido o l'elemento che circola nel sistema di raffreddamento.

Nei suoi primi sviluppi, a partire dal 1950, la produzione dell'energia nucleare per fissione contempla sostanzialmente due modelli di reattori dettati dalla scelta del combustibile: l'uranio naturale. La necessità di un moderatore efficace, cioè poco incline alla cattura e all'assorbimento di neutroni di fronte a un combustibile con debole percentuale di U-235, l'isotopo propriamente fissile, impose da un lato la grafite, dall'altro l'acqua pesante ovvero l'ossido di deuterio (D_2O). I primi reattori a grafite o ad acqua pesante dovevano, dopo breve tempo, cedere il passo a reattori più avanzati, alimentati da uranio arricchito e raffreddati a gas.

Dopo il 1970, i reattori convenzionali, di carattere quasi esclusivamente commerciale, sono in genere reattori termici. Si tratta di reattori alimentati da uranio arricchito che utilizzano neutroni lenti, con il moderatore separato, cioè estraneo al combustibile, raf-

circuiti, il circuito primario e quello secondario. Il circuito primario trasporta il calore prodotto dalla reazione di fissione e lo congela verso uno scambiatore che lo trasferisce al circuito secondario; qui il calore viene trasformato in vapore che a sua volta mette in funzione le turbine per la generazione di energia elettrica. L'elemento che trasferisce il calore, e che circola nel sistema, è generalmente acqua naturale o, in particolari tipi di reattore, metallo fuso. Infine, per quanto riguarda i dispositivi di controllo, la potenza di un reattore di fissione in esercizio è costantemente monitorata attraverso la misurazione di parametri fondamentali quali la temperatura, il flusso termico, il livello di attività nucleare. L'attività radioattiva che si sprigiona dal reattore nel corso del processo di fissione e dai residui di fissione è assorbita da strutture di contenimento che circondano il reattore stesso e il circuito primario. Un'ulteriore protezione è costituita da un sistema autonomo di raffreddamento del nucleo, che interviene in caso di eventuale surriscaldamento del reattore non tamponato a causa di un'avarìa del sistema di refrigerazione principale. Una calotta esterna funge da struttura di contenimento in caso di perdite di materiale radioattivo.

2. Reattori termici e reattori veloci autofertilizzanti

Gli elementi in base ai quali si distinguono i diversi tipi di reattori a fissione nucleare sono tre: il combustibile utilizzato; il moderatore e la sua collocazione; il liquido o l'elemento che circola nel sistema di raffreddamento.

Nei suoi primi sviluppi, a partire dal 1950, la produzione dell'energia nucleare per fissione contempla sostanzialmente due modelli di reattori dettati dalla scelta del combustibile: l'uranio naturale. La necessità di un moderatore efficace, cioè poco incline alla cattura e all'assorbimento di neutroni di fronte a un combustibile con debole percentuale di U-235, l'isotopo propriamente fissile, impose da un lato la grafite, dall'altro l'acqua pesante ovvero l'ossido di deuterio (D_2O). I primi reattori a grafite o ad acqua pesante dovevano, dopo breve tempo, cedere il passo a reattori più avanzati, alimentati da uranio arricchito e raffreddati a gas.

Dopo il 1970, i reattori convenzionali, di carattere quasi esclusivamente commerciale, sono in genere reattori termici. Si tratta di reattori alimentati da uranio arricchito che utilizzano neutroni lenti, con il moderatore separato, cioè estraneo al combustibile, raf-

freddati ad acqua naturale, *Light Water Reactor* (Lwr), con potenza compresa tra i 700 e i 1300 Mw (megawatt).

I reattori a fissione raffreddati ad acqua naturale sono di due tipi:

- reattori ad acqua in pressione, *Pressurized Water Reactor* (Pwr);
- reattori ad acqua bollente, *Bowling Water Reactor* (Bwr).

Il reattore ad acqua in pressione (Pwr) è molto diffuso perché tecnologicamente semplice; non pone problemi di reperibilità né dei materiali né del combustibile (uranio arricchito), offrendo al contempo alte garanzie di sicurezza. L'acqua viene mantenuta a una pressione di 155 atmosfere per impedirne l'ebollizione, e assolve il compito di refrigerante e di liquido di funzionamento, cioè moderatore. Il nocciolo è formato da schiere di barre di combustibile rivestite di zirconio (Zr) e costituite da piccoli cilindri di biossido di uranio (UO_2) debolmente arricchito. L'elemento combustibile presenta una schiera standard di 17 per 17 barre: duecento di questi elementi formano il nocciolo del reattore, che misura 3,5 metri in altezza e 3,5 metri di diametro, ed è racchiuso da un recipiente in pressione con pareti di uno spessore di 15 o 20 centimetri. Il calore prodotto dalle reazioni di fissione viene rimosso dall'acqua messa in circolo. Pompato nel nocciolo, il refrigerante ha una temperatura di 290 °C, ma al momento della sua uscita la sua temperatura è di 325 °C. Il livello dell'energia è monitorato da barre di controllo costruite con materiale in grado di moderare le fissioni assorbendo i neutroni termici; il controllo avviene semplicemente: è sufficiente inserire o estrarre le barre incastrate nelle schiere di combustibile. Per bloccare la reazione a catena, sia per sostituire il combustibile sia in caso di incidente, basta abbassare tutte le barre di controllo nel nocciolo. Nel circuito di raffreddamento primario del reattore, l'acqua ad alta temperatura proveniente dal nocciolo passa da uno scambiatore che trasmette il calore a un circuito di vapore secondario a pressione inferiore. Il vapore prodotto si espande nella turbina che aziona il generatore di corrente elettrica. Il ciclo si chiude quando il vapore, condensato, è immerso nuovamente nello scambiatore. La condensazione del vapore è ottenuta attraverso l'acqua di un terzo circuito, completamente isolato dalla zona radioattiva, che viene refrigerato ad aria nelle grandi torri di raffreddamento, dalle quali esce solo vapore acqueo. L'acqua di questo terzo circuito viene prelevata da un fiume o un lago.

Nei reattori ad acqua bollente (Bwr), l'acqua raggiunge il punto di ebollizione nel nocciolo, a una pressione assai contenuta di 70 atmosfere, senza la necessità di ricorrere a uno scambiatore di calore intermedio. Il vapore prodotto viene inviato direttamente nella turbina, quindi condensato e nuovamente introdotto nel reattore. Anche in questo tipo di reattore, l'acqua di refrigerazione del condensatore proviene da una fonte completamente estranea alla zona contaminata dalle radiazioni.

A partire dal 1984, dopo decenni di ricerca e di sperimentazione, è entrato in esercizio un reattore di nuova concezione, a ragione denominato autofertilizzante. Si tratta del *Superphénix*, installato a Creys-Malville, in Francia.

Come è stato in precedenza sottolineato, questo tipo di reattore è in grado di produrre una quantità di combustibile maggiore rispetto a quella utilizzata per il proprio funzionamento. Le condizioni più favorevoli per raggiungere questo risultato si ottengono quando il plutonio fissile (Pu-239) e l'uranio fertile (U-238) sono usati insieme in un reattore a neutroni veloci, ovvero neutroni che non vengono rallentati da un moderatore nel periodo brevissimo di tempo compreso fra il momento in cui vengono emessi in seguito a una reazione di fissione e il momento in cui provocano la reazione successiva. Nel *Superphénix* il materiale fissile è una miscela combustibile con una media di 17% di biossido di plutonio (PuO_2) e 83% di biossido di uranio (UO_2), il materiale fertile è composto esclusivamente di biossido di uranio. In queste condizioni, il rapporto di rigenerazione può effettivamente superare anche notevolmente l'unità. La carica iniziale di Pu-239 serve per dare avvio alle reazioni di fissione a catena e alla produzione di energia. Durante questo periodo, il plutonio viene prodotto dall'uranio naturale o da U-235 nel nocciolo e nel mantello che lo circonda. Allorché i gruppi di elementi di combustibile che costituiscono il nocciolo e il mantello sono stati per lungo tempo sottoposti a radiazioni, devono essere ritrattati chimicamente per separare e asportare i diversi materiali di fissione. Orbene, in ogni nuovo trattamento viene recuperata una quantità di plutonio (Pu-239) maggiore rispetto a quella esistente all'inizio dell'irraggiamento. Il plutonio in eccesso viene custodito a parte e sostituito nel reattore con uranio naturale o impoverito.

L'utilizzazione di neutroni veloci, oltre a implicare l'assenza di un moderatore, comporta anche che le dimensioni del nocciolo del reattore siano assai compatte; in un impianto di 1000 MW di po-

tenza, il volume del nocciolo non supera i 10 m^3 . Per loro stessa natura, questo genere di reattori producono una grande quantità di calore per unità di volume. Per mitigare questa fortissima produzione di calore bisogna utilizzare un refrigerante dotato di notevoli proprietà termiche; tra gli elementi potenzialmente impiegabili, la scelta è caduta sul sodio (Na). Questo elemento metallico si presenta allo stato liquido a una temperatura di $98 \text{ }^\circ\text{C}$ e raggiunge l'ebollizione, a pressione atmosferica, a $882 \text{ }^\circ\text{C}$. Nel nocciolo del reattore, la temperatura massima raggiunta dal sodio liquido non supera normalmente i $550 \text{ }^\circ\text{C}$, il che comporta l'ulteriore vantaggio di evitare la pressurizzazione dei recipienti e dei circuiti che lo contengono. Infine, le eccellenti proprietà termiche del sodio fanno sì che il vapore abbia caratteristiche equivalenti a quelle richieste per azionare le turbine delle più moderne centrali termoelettriche alimentate da combustibile fossile.

3. I nodi da sciogliere

A fronte di un contributo che, sul piano delle grandi quantità di energia erogata, non può essere messo in discussione, giacché copre circa il 6% dell'energia mondiale prodotta in un anno, il futuro dell'energia nucleare da fissione pone inevitabilmente alcune questioni relative alla sicurezza, al trattamento dei rifiuti nucleari, al conseguimento di una completa efficienza, e, infine, alla sua convenienza economica.

La questione della sicurezza si pone sotto un duplice aspetto. Il primo è relativo al non perfetto funzionamento e, di conseguenza, all'efficacia dei sistemi di controllo e di emergenza, *interno* allo stesso processo di produzione dell'energia nucleare da fissione. Il secondo prende in considerazione situazioni di pericolosità e di rischio provenienti dall'*esterno*, dovute a eventi naturali o all'azione dell'uomo. Nel corso della sua storia, la tecnologia degli impianti nucleari ha dovuto far fronte a due soli incidenti, riconosciuti e classificati come tali. Il primo incidente, certamente serio e grave, ma positivamente risolto e ridimensionato proprio grazie ai sistemi posti a garanzia dell'impianto, si è verificato il 29 marzo 1979 nella centrale di Three Miles Island in Pennsylvania (Usa). L'impianto installava un reattore del tipo Pwr. Un errore commesso durante le operazioni di ordinaria manutenzione e il difettoso funzionamento di una valvola di controllo provocò una lieve perdita nel circuito di

tenza, il volume del nocciolo non supera i 10 m³. Per loro stessa natura, questo genere di reattori producono una grande quantità di calore per unità di volume. Per mitigare questa fortissima produzione di calore bisogna utilizzare un refrigerante dotato di notevoli proprietà termiche; tra gli elementi potenzialmente impiegabili, la scelta è caduta sul sodio (Na). Questo elemento metallico si presenta allo stato liquido a una temperatura di 98 °C e raggiunge l'ebollizione, a pressione atmosferica, a 882 °C. Nel nocciolo del reattore, la temperatura massima raggiunta dal sodio liquido non supera normalmente i 550 °C, il che comporta l'ulteriore vantaggio di evitare la pressurizzazione dei recipienti e dei circuiti che lo contengono. Infine, le eccellenti proprietà termiche del sodio fanno sì che il vapore abbia caratteristiche equivalenti a quelle richieste per azionare le turbine delle più moderne centrali termoelettriche alimentate da combustibile fossile.

3. I nodi da sciogliere

A fronte di un contributo che, sul piano delle grandi quantità di energia erogata, non può essere messo in discussione, giacché copre circa il 6% dell'energia mondiale prodotta in un anno, il futuro dell'energia nucleare da fissione pone inevitabilmente alcune questioni relative alla sicurezza, al trattamento dei rifiuti nucleari, al conseguimento di una completa efficienza, e, infine, alla sua convenienza economica.

La questione della sicurezza si pone sotto un duplice aspetto. Il primo è relativo al non perfetto funzionamento e, di conseguenza, all'efficacia dei sistemi di controllo e di emergenza, *interno* allo stesso processo di produzione dell'energia nucleare da fissione. Il secondo prende in considerazione situazioni di pericolosità e di rischio provenienti dall'*esterno*, dovute a eventi naturali o all'azione dell'uomo. Nel corso della sua storia, la tecnologia degli impianti nucleari ha dovuto far fronte a due soli incidenti, riconosciuti e classificati come tali. Il primo incidente, certamente serio e grave, ma positivamente risolto e ridimensionato proprio grazie ai sistemi posti a garanzia dell'impianto, si è verificato il 29 marzo 1979 nella centrale di Three Miles Island in Pennsylvania (Usa). L'impianto installava un reattore del tipo Pwr. Un errore commesso durante le operazioni di ordinaria manutenzione e il difettoso funzionamento di una valvola di controllo provocò una lieve perdita nel circuito di

raffreddamento. Il reattore si spense automaticamente come dovuto, mentre l'impianto ausiliario di emergenza entrò efficacemente in funzione come previsto. La quantità di radioattività fuoriuscita fu estremamente ridotta e senza effetti apprezzabili sull'ambiente e le popolazioni. Il secondo incidente, questo sì gravissimo, si è verificato il 26 aprile 1986 a Černobyl, località ai confini tra l'Ucraina e la Bielorussia, all'epoca due repubbliche dell'ex Unione Sovietica. Con i suoi quattro reattori, la centrale di Černobyl generava 4000 MW di elettricità. Sebbene costruito nel 1983, l'impianto sovietico era concepito con una tecnologia appartenente a modelli ormai obsoleti e superati. Non solo era sprovvisto di una cupola di contenimento, ma utilizzava la grafite come moderatore. In questo tipo di reattori, all'epoca vietati da oltre dieci anni in Europa occidentale, se la temperatura sale in modo incontrollato la grafite reagisce con l'acqua di raffreddamento. L'incidente fu dovuto esclusivamente al fattore umano e, precisamente, nel corso di un'esercitazione per lo studio di un sistema di sicurezza in condizioni critiche. Così, esclusi incredibilmente i sistemi automatici di spegnimento del nocciolo, il reattore fu portato volutamente a una potenza di molto inferiore a quella consigliata, condizione che, come era prevedibile, rese instabile il nocciolo e innescò una reazione a catena incontrollabile. La conseguenza fu l'esplosione del nocciolo del reattore numero 4, dell'edificio e della sala turbine; la grafite s'incendiò; una colonna di fumo, senza trovare ostacoli di sorta, si levò alta nel cielo e trasferì nell'atmosfera una quantità rilevante di elementi radioattivi e prodotti di fissione.

La dinamica dei due incidenti è di per sé eloquente: nel primo caso, tecnologie all'avanguardia anche sul piano della sicurezza hanno ridimensionato di molto la gravità e gli effetti di una eventuale contaminazione radioattiva; nel secondo caso, la catastrofe *non poteva non realizzarsi*, era inevitabile, benché i dati ormai accettati e accessibili ne offrano una rappresentazione molto meno apocalittica di quanto ci si aspettava in un primo momento. Ciò non toglie, ovviamente, che la ricerca di sistemi assolutamente sicuri non abbia continuato il proprio cammino, ad esempio predisponendo una doppia cupola di contenimento, e prospettando addirittura un modello di reattore a sicurezza intrinseca, cioè tale da poter operare solo sulla base di leggi naturali, minimizzando e, di fatto, rendendo ininfluente il fattore umano nei riguardi di due funzioni decisive quali lo

spegnimento o arresto della reazione a catena e la rimozione del calore residuo.

Dopo l'attentato dell'11 settembre 2001 alle Torri Gemelle di New York, nuove e legittime preoccupazioni si sono addensate nei riguardi di potenziali pericoli esterni, ai quali potrebbe esser sottoposto un impianto elettronucleare. Costruita in grado di poter far fronte a eventi naturali imprevedibili, come terremoti devastanti o fenomeni atmosferici particolarmente disastrosi come gli uragani, una centrale nucleare non può più ignorare o classificare come remota la possibilità di un attentato terroristico. Le tecnologie per rendere ancor più sicuri gli edifici vitali e sensibili non mancano, così come le tecniche organizzative per una vigilanza affidabile anche su questo fronte.

La questione dei rifiuti nucleari si lega, da un certo punto di vista, a quella della sicurezza, dal momento che pone interrogativi circa l'impatto che gli eventuali depositi di stoccaggio (temporaneo o definitivo) possono avere sull'ambiente e sull'uomo nel medio e lungo periodo, nonché la loro vulnerabilità rispetto a tentativi di sabotaggio o di illecita appropriazione del materiale radioattivo.

I rifiuti di un impianto elettronucleare differiscono da quelli prodotti da una centrale a carbone per due aspetti fondamentali. In primo luogo, la quantità di rifiuti di origine nucleare è milioni di volte inferiore rispetto alla quantità di scorie prodotte dal carbone. In un anno di attività, un reattore di 1000 MW produce circa 2 m³ di scorie. In secondo luogo, benché modesto, il quantitativo del rifiuto nucleare costituisce di fatto un pericolo, dato il suo potenziale radioattivo.

Le scorie ad alto livello radioattivo generate dal processo di fissione nucleare provengono da due distinte fonti: quella commerciale per la produzione di energia elettrica, quella militare, per la produzione di plutonio (Pu-239), necessario per la produzione di ordigni bellici. La diversa origine del rifiuto nucleare implica una differenza del livello di attività radioattiva e la necessità di distinguere le scorie tanto sul piano della sicurezza a lungo termine, quanto sul piano del trattamento loro riservato. Le scorie provenienti da impianti commerciali sono costituite dal combustibile esausto che contiene significative percentuali di isotopi di uranio e di plutonio, zirconio (Zr), nettunio (Np-237), americio (Am-243), curio (Cm-244) e altri prodotti di fissione. Le scorie di provenienza militare sono di diversi tipi e comprendono anche il materiale esausto. La componente maggioritaria dei rifiuti nucleari è costituita dal residuo di riproces-

samento, dove prevalgono le quote di cesio (Cs-137) e di stronzio (Sr-90), con tempo di dimezzamento di circa trent'anni; infine di tecnezio (Tc-99), con un tempo di dimezzamento di 211.000 anni. Dopo esser stati riciclati, gli elementi combustibili sono disposti in contenitori e immagazzinati in depositi schermati e sorvegliati in vista di future destinazioni oppure vengono convertiti in composti stabili che ne riducono anche il volume, vetrificati e collocati in contenitori di acciaio inossidabile che saranno interrati in magazzini sotterranei.

La vetrificazione e l'interramento a opportune profondità in aree geologicamente idonee sono attualmente le uniche alternative percorribili. Il livello di sicurezza è affidabile, specie se si considera un fatto elementare troppe volte messo colpevolmente in ombra: il fatto che il fenomeno radioattivo non solo è maggiormente conosciuto, ma, rispetto alle reazioni di tipo chimico, è sostanzialmente controllabile attraverso strumenti di misura semplici e totalmente affidabili. Non è del resto un caso che lo sviluppo della ricerca medica in questo settore (medicina nucleare) si incrementi giorno dopo giorno con successi sempre più importanti e incoraggianti.

L'età media di un impianto nucleare è di venticinque anni. Dopo questo lasso di tempo, nel corso del quale la continua esposizione alle radiazioni ha inevitabilmente contaminato le strutture più esposte, la centrale deve essere smantellata a partire dagli ambienti più compromessi; un'operazione che pur essendo condotta in sicurezza si protrae per non meno di un decennio.

La questione della completa utilizzazione della fissione nucleare si decide interamente sulla scelta a favore di reattori di nuova concezione autofertilizzanti, con combustibile a base di torio, peraltro già sfruttato in reattori a neutroni lenti, e sulla possibilità di allungare notevolmente il periodo di attività degli impianti rispetto ai tempi attuali. Senza questa prospettiva strategica, anche in vista della realizzazione di processi di fusione controllata, continuando a bruciare uranio, sebbene in processi autofertilizzanti, si stima che le risorse disponibili per il futuro siano al massimo dieci volte maggiori di quelle consumate fino a oggi. Con l'impiego di reattori veloci e del torio, la disponibilità di combustibile diventerà praticamente illimitata. Tutto questo provocherà un abbassamento dei costi: ultima questione sulla quale, tuttavia, al momento non è possibile fornire dati affidabili. La scelta del torio ridimensiona infine le preoccupazioni di sicurezza relative alla produzione di plutonio.

Nel processo di autofertilizzazione con il torio si ottengono due risultati molto significativi: la quantità di plutonio contenuta nel combustibile esausto è notevolmente ridotta rispetto all'attuale quantitativo garantito dai reattori autofertilizzanti; il tipo di plutonio che se ne ricava presenta una esigua percentuale di Pu-238, altamente radioattivo e indispensabile, assieme a Pu-239, per gli scopi bellici.

CONSIDERAZIONI ETICHE

Che l'interrogativo etico, quello che considera l'agire e il comportamento dell'essere umano, vada ben oltre il rapporto che l'uomo, in quanto animale razionale dotato di coscienza e di libertà, ha con se stesso e con gli altri, è ormai un dato di fatto. Il problema morale investe in modo diretto la modalità attraverso la quale l'uomo si relaziona con la stessa realtà esterna e con le altre forme di vita che, di questa realtà, fanno parte. Perché?

La risposta va cercata non nelle pieghe di una constatazione imposta da una convinzione ampiamente condivisa e divenuta quasi una moda, ma nei motivi che ne stanno a fondamento e che ne giustificano la rilevanza.

Nella realtà naturale noi vediamo la costituzione di un ordine ben strutturato e, come tale, accessibile e conoscibile dal nostro intelletto e dalla nostra ragione. L'intelligenza e la razionalità ci spingono a riconoscere che, in un certo qual modo, vi è una reciprocità e una dipendenza tra l'uomo e il sistema naturale, l'ambiente in cui è inserito e vive. Se l'uomo dipende dall'ambiente, quest'ultimo sembra in parte dipendere, almeno per quanto riguarda il suo equilibrio, dall'attività che l'uomo vi svolge. Far piena luce su questa dipendenza, così ben evidenziata dai rapporti tra l'energia e l'ambiente, non è solo un'esigenza speculativa ardua e attraente, giacché il piacere della conoscenza per se stessa eleva ancor più l'individuo nella sua umanità e lo fa crescere nella dimensione della sua libertà; tale dipendenza è anche un'urgenza pratica: affrontarla è doveroso nei riguardi di noi stessi e degli altri! Questo *principio di responsabilità*, diretta emanazione della libertà e di ogni atto volontario, deve essere affermato con forza, a maggior ragione quando l'umanità in generale, e la scienza in particolare, sono chiamate a rispondere a sfide cruciali, quale quella innescata dalle conseguenze di un innalzamento globale della temperatura terrestre. Tale principio si spinge infatti oltre il riconoscimento dei diritti individuali, dal momento che considera come primo il dovere di tutela che ciascun individuo ha nei riguardi

di tutti coloro sulla cui vita può influire direttamente o indirettamente attraverso le proprie azioni.

A fronte di molte, forse troppe incertezze, una cosa è infatti assolutamente certa: indietro non si può tornare. Gli attuali livelli di benessere materiale (quantità di beni a disposizione) e di qualità della vita, di cui potrà godere in prospettiva l'intera umanità, rappresentano un valore non negoziabile. Ciò significa, come è agevole dedurre stante la situazione attuale, incremento della domanda di energia, del resto già prevista doppia del livello di consumo corrente nel 2050, e conseguente possibile aggravamento dei fattori responsabili del degrado ambientale, cioè delle varie forme di inquinamento, in generale, e di quelle che, in particolare, sono considerate alla base del fenomeno dell'incremento termico della Terra. Cosa fare?

Se indietro non si può tornare, se dobbiamo guardare avanti, ciò non vuol dire lasciare implicitamente le cose come sono, conservare lo status quo nella speranza che la natura stessa provveda totalmente ai danni di cui certo non è responsabile, ma neppure limitarsi a prospettare iniziative di emergenza ogni qualvolta si è di fronte all'ennesimo disastro ambientale, con o senza perdita di vite umane. Al contrario, è doveroso assumere consapevolmente precise iniziative inserite in un quadro progettuale globale, accompagnate da comportamenti individuali e collettivi ispirati da un significativo *cambiamento della mentalità*. Questa consapevolezza, che fatica non poco a imporsi alla comprensione e alla condivisione operosa, sta tutta in una nozione che, seppur timidamente ma fortunatamente con continuità, è proposta all'attenzione dell'opinione generale: il concetto di *sviluppo sostenibile*. Si tratta, in buona sostanza, di elaborare e perseguire, con un vincolo che deve assumere sempre più i caratteri dell'urgenza e della necessità, un modello di sviluppo che consenta una crescita economica in grado di non compromettere l'integrità degli ecosistemi e la loro potenzialità di soddisfare i bisogni delle generazioni future.

I principi cardine su cui si fonda il concetto di sviluppo sostenibile risalgono al 1972, anno in cui ebbe luogo l'assemblea internazionale ormai nota come Conferenza di Stoccolma. In quella sede si riconobbe esplicitamente: da un lato, che l'uomo è il *soggetto responsabile primario* della protezione e del miglioramento dell'ambiente Terra nei riguardi dell'attuale generazione umana e di quelle future; dall'altro, che le risorse naturali del pianeta necessitano di salvaguardia e tutela attraverso una programmazione adeguata e attenta, tesa addirittura

a migliorare la capacità del sistema naturale di produrre risorse rinnovabili. Poco più di un decennio dopo Stoccolma, l'Organizzazione delle nazioni unite istituiva formalmente una commissione deputata a indagare una soluzione realistica e percorribile al problema del soddisfacimento dei bisogni primari per una popolazione mondiale in continua crescita. Al termine dei lavori la commissione evidenziò alcune priorità, due delle quali, in particolare, segneranno le tappe di un percorso che, almeno sul piano della sensibilizzazione, ha ottenuto alcuni risultati importanti. La prima urgenza consisteva nell'esame delle più pressanti questioni ambientali e la creazione di nuove forme di cooperazione internazionale in modo di far fronte, sul terreno globale, a ogni specifico problema. La seconda urgenza si riassumeva in un invito a operare in modo da innalzare il grado di consapevolezza del problema ambientale ed educare in tal senso i responsabili politici e amministrativi, nonché i semplici cittadini, a un maggiore impegno e partecipazione attiva. In questa direzione, nel 1989 le Nazioni unite convocarono la Conferenza su *Ambiente e sviluppo* e, tre anni più tardi, la Conferenza mondiale sullo stesso tema, con sede a Rio de Janeiro.

Lo scopo dell'iniziativa Onu, la cui eco è tutt'ora presente, era chiaro: si trattava di individuare strategie praticabili ed efficaci per riuscire a conciliare le esigenze dei Paesi poveri e quelle dei Paesi industrializzati. Il documento finale della Conferenza di Rio, denominato Agenda 21, può essere considerato un sicuro punto di riferimento per il prosieguo di una riflessione che intenda tener conto della nozione di sviluppo globale sostenibile nel XXI secolo. Nel dicembre del 1997, a Kyoto, la comunità internazionale è tornata a discutere nuovamente di problematiche ambientali e, in particolare, del riscaldamento globale del pianeta sulla base del contributo offerto dall'Ipcc che, come abbiamo avuto modo di segnalare, aveva iniziato la sua attività nel 1988. Ma se a Rio de Janeiro furono semplicemente indicati i caratteri generali a cui le singole nazioni partecipanti avrebbero potuto, ma non necessariamente dovuto, attenersi, in terra giapponese è stato stilato un vero e proprio protocollo con obiettivi precisi e vincolanti; per esempio, i Paesi industrializzati e la maggior parte di quelli dell'Europa orientale sono impegnati a ridurre del 5% le principali emissioni dei gas "serra" nel periodo 2008-2010.

Che nel complesso i risultati raggiunti possano apparire insoddisfacenti, se commisurati all'urgenza e all'ampiezza di una risposta che deve essere necessariamente molto articolata e globale, non toglie

che un primo importante obiettivo, quello di focalizzare l'attenzione dell'opinione pubblica mondiale e dei governi delle nazioni, è stato colto. Si tratta di continuare su questa strada, *tenendo alta la tensione tanto sul problema quanto sul principio di responsabilità* individuale e collettiva applicando i necessari correttivi con gli strumenti e i mezzi attualmente disponibili.

La nozione di sviluppo sostenibile si fonda sulla concreta realizzazione di uno sfruttamento e di una gestione razionale delle risorse ambientali, tali da soddisfare i bisogni fondamentali dell'umanità. I criteri da seguire per raggiungere un simile traguardo sono noti: anzitutto la conservazione dell'equilibrio generale, il che significa intervenire preventivamente per evitare l'esaurimento delle riserve naturali e diminuire sensibilmente e costantemente la produzione di rifiuti; in secondo luogo, razionalizzare la produzione e il consumo dell'energia; infine, operare una distribuzione e un uso delle risorse il più possibile equo tra le nazioni e le regioni del pianeta.

Sappiamo che l'ambiente Terra può essere considerato come un unico grande sistema nel quale i tre grandi domini, l'atmosfera, l'idrosfera e la litosfera interagiscono tra loro e rendono di fatto possibile la vita del quarto dominio, quello appunto della biosfera. Sono perfettamente noti anche i problemi che, dominio per dominio, giungono a minacciare più che seriamente l'intero sistema.

Nei riguardi dell'atmosfera, le responsabilità delle attività umane chiamate in causa non solo per il progressivo innalzamento della temperatura terrestre ma anche per le sostanze inquinanti, veleni, che mettono in pericolo la vita e producono smog, piogge acide ecc., sono sufficientemente definite. Che cosa si sta facendo? I Paesi firmatari della convenzione sui cambiamenti climatici stipulata a Rio de Janeiro si sono accordati sull'esigenza di interventi di due tipi: quelli relativi all'acquisizione costante di informazioni climatiche (monitoraggio), e quelli rivolti al settore energetico, specie per quanto riguarda i trasporti e la piaga del depauperamento dei serbatoi naturali di CO₂.

Per prima cosa, sono stati definiti e fissati i valori considerati provvisoriamente accettabili degli elementi inquinanti presenti nell'aria e, in particolare, quelli che si ritiene influiscano come gas "serra". Dopo aver potenziato le reti di rilevamento sono state elaborate strategie e provvedimenti per tentare di ricondurre i valori delle sostanze incriminate entro i limiti stabiliti. Molti interventi hanno riguardato il controllo degli inquinanti che derivano direttamente dal

processo di combustione, cioè i gas di scarico degli automezzi, i fumi degli impianti di riscaldamento e di quelli industriali. L'obbligo delle marmitte catalitiche per gli autoveicoli rientra in queste misure d'intervento: se pienamente efficiente, il dispositivo catalitico rende inattivi i fumi più pericolosi riducendo in particolare le emissioni di monossido di carbonio (CO). Analogo provvedimento sarebbe auspicabile anche per i motocicli e le motociclette. In questa direzione è sembrata andare anche la sostituzione delle benzine con elevate percentuali di piombo, benché un simile provvedimento non sia esente da giustificate critiche non tanto nel metodo quanto nel merito, ossia nei riguardi del combustibile scelto come sostituto. In effetti, la cosiddetta benzina verde non contiene piombo (che è grigio), ma in compenso è ricca di idrocarburi aromatici, tra i quali figura il benzene, che vengono emessi dai gas di scarico e sono estremamente dannosi per la salute umana. Si tenga presente che il benzene è riconosciuto come sostanza potenzialmente cancerogena e che nelle città con una popolazione superiore ai 150.000 abitanti le sue concentrazioni superano da due a tre volte i limiti consentiti, attualmente di 10 microgrammi per ogni metro cubo di aria.

Gli incentivi previsti in merito alla sostituzione del gasolio per uso domestico con il gas metano e la crescente diffusione capillare della rete di distribuzione sta riducendo notevolmente la quantità di anidride solforosa immessa nell'atmosfera.

Assai più complesso da gestire è il problema del controllo degli inquinanti emessi dall'industria, anche perché il fenomeno delle piogge acide si verifica a distanze anche considerevoli dal luogo di produzione ed emissione dei fumi tossici. La vigente normativa in materia di sicurezza sul lavoro, oltre che ambientale, potrebbe costituire un effettivo sostegno sul piano dei controlli, in particolare per quanto riguarda il settore petrolchimico.

Nonostante tutto, in determinati periodi dell'anno, con il favore di particolari condizioni ambientali quali il perdurare dell'alta pressione e l'assenza di ventilazione, si è ancora costretti a ricorrere a misure straordinarie, come la chiusura totale o parziale delle città al traffico veicolare, allorché i parametri fissati per le polveri sottili in sospensione e le particelle di metalli pesanti superano i livelli di guardia. Segno che non molto, ma moltissimo resta ancora da fare tanto sul piano dell'educazione ambientale, cioè della consapevolezza del valore dell'ambiente in cui viviamo, quanto su quello concreto e operativo, ossia l'assunzione vera e propria del *principio di*

responsabilità. Del resto, al di là dei controlli ufficiali, con una semplice operazione è possibile stabilire in modo sufficientemente attendibile quanto smog respiriamo nell'ambiente che maggiormente frequentiamo. Se esponiamo un drappo di tessuto bianco per un mese a una delle finestre della nostra abitazione, vi si depositeranno in media circa 20 grammi di polvere normalmente dispersa nell'aria. La contaminazione fa assumere al tessuto una particolare colorazione grigiastrea. Il confronto della colorazione acquisita dal nostro drappo originariamente bianco con una scala cromatica di riferimento, facilmente reperibile presso le associazioni o gli enti che si occupano di ambiente, evidenzia il grado di eventuale inquinamento con un debolissimo margine di errore.

Non solo si deve, ma si può fare molto di più. Prendiamo il caso dell'Italia, per certi aspetti paradigmatico nel panorama europeo. Ebbene, nel nostro Paese il trasporto delle merci avviene per l'80% su gomma, cioè con l'ausilio di grandi automezzi che emettono notevoli quantità di gas di scarico, quindi CO₂ ecc. Per unità di merce trasportata, il treno produce meno di un decimo delle emissioni inquinanti di un Tir. Per questo motivo è stata avanzata la proposta, che strategicamente avrebbe avuto senso adottare almeno cinquant'anni fa, di limitare drasticamente il traffico delle merci su strada favorendo quello su rotaia, ossia il trasporto ferroviario. Ciò significherebbe, è vero, affrontare ristrutturazioni e iniziative infrastrutturali di un certo peso economico, ma è giocoforza che ciò si verifichi, e non solo nel settore dei trasporti terrestri. L'automobile elettrica, del resto, non è una fantasia ma un mezzo che già ora può essere sostenuto e propagandato: eventuali sgravi fiscali tanto per le industrie costruttrici, che così potrebbero investire in ulteriore ricerca, quanto per i proprietari di parchi macchine di interesse pubblico, come gli enti locali e i ministeri per non parlare dei trasporti, potrebbero rappresentare un buon esempio da estendere anche al settore privato rispetto ai pochi casi esistenti.

Limitare le emissioni nocive derivanti dalla combustione di prodotti fossili è un compito che, in ogni caso, ciascuno può personalmente assumere adottando pochi ed elementari comportamenti. La perfetta efficienza del motore della nostra autovettura o dello scooter sono il risultato di periodici controlli di messa a punto e di revisione, peraltro già previsti dalla legislazione per i veicoli che superano un certo numero di anni, che contribuiscono a limitare l'inevitabile inquinamento del mezzo. A questo primo passo ne può se-

guire un secondo, assai più significativo: quello di decidere di spostarsi facendo a meno dei veicoli a motore tradizionale o, comunque, utilizzando al massimo il servizio pubblico. Un altro semplice accorgimento è quello di limitare il riscaldamento nelle nostre abitazioni e ridurre il consumo di prodotti industriali che richiedono l'impiego di combustibili fossili, come pure installare caldaie domestiche dopo aver accuratamente valutato le diverse tipologie, dando priorità ai modelli che garantiscono minor consumo e maggiore controllabilità: è questo un modo indiretto di invitare le case costruttrici a progettare nuove soluzioni meno inquinanti. Quando le condizioni lo consentono, l'opzione dovrebbe ovviamente orientarsi su generatori di calore solare.

L'inquinamento dell'aria ha indubbiamente dimensioni globali e il suo controllo va ben oltre l'impegno del singolo. Tuttavia, oltre ai comportamenti suggeriti come esempio, grande rilievo può ricoprire l'onere educativo nei confronti delle giovani generazioni. Sarebbe peraltro auspicabile che l'educazione ambientale entrasse stabilmente nella formazione dell'individuo, a partire dall'infanzia. Non si deve del resto dimenticare che proprio i bambini sono i più esposti agli effetti degli inquinanti prodotti dal traffico veicolare. Sensibilizzare al problema ambientale significa anche informare che l'equilibrio che stiamo pericolosamente perdendo può essere recuperato anche facendo affidamento sulle potenzialità proprie della natura e, in tal senso, tutelarle e renderle pienamente attive. Vi sono ad esempio dei vegetali, quali l'azolla, una particolare specie di felce acquatica, in grado di assorbire piombo, cadmio, rame e zinco. La coltivazione e l'impianto di vegetali di questo tipo in particolari aree a rischio contribuisce sensibilmente a purificare l'aria, nonché al rimboschimento della zona interessata, aspetto anche questo cruciale perché direttamente implicato nel contenimento di CO₂. I boschi, le foreste e la vegetazione in generale sono, come sappiamo, un grande e fondamentale serbatoio di anidride carbonica, come del resto le torbiere, cioè i grandi depositi di vegetali non decomposti. Proprio queste ultime devono essere particolarmente tutelate perché hanno la caratteristica di trattenerne anidride carbonica; la loro presenza, che è distribuita su almeno 5 milioni di chilometri quadrati, deve essere salvaguardata.

Rispetto all'atmosfera, la situazione degli altri due domini fondamentali per la vita, quello dell'acqua e quello del suolo, non è meno preoccupante, esposti anch'essi come sono alle conseguenze dell'innalzamento della temperatura del pianeta.

Che l'acqua sia la risorsa vitale per eccellenza lo sappiamo bene. Ciò di cui è invece necessario prender coscienza, in vista di una sostanziale modifica dei comportamenti e dei piani relativi al suo sfruttamento, è che l'acqua è un bene la cui disponibilità è limitata per due ordini di motivi. Il primo limite è dovuto all'incedere di eventi fisici come la siccità e la progressiva desertificazione di vaste zone del pianeta, che subirà ulteriori incrementi in relazione all'aumento della temperatura, dovuta a uno sfruttamento eccessivo e spesso sconsiderato della risorsa. Il secondo limite è chiaramente imputabile all'accanita opera di deforestazione, di disboscamento intensivo specie nell'area tropicale, che riduce il vapore acqueo nell'atmosfera e la quantità di precipitazioni che favoriscono la crescita della vegetazione. Si tratta di una limitazione che ha gravi ripercussioni anche sul suolo. A completare un quadro non certo incoraggiante interviene poi il livello di inquinamento che, a partire dai torrenti e dai fiumi, finisce per interessare i laghi e i mari destabilizzando gli equilibri esistenti e procurando, anche in questo dominio, gravissimi danni alla biodiversità. È opportuno ricordare che anche le sostanze cosiddette biodegradabili contribuiscono ad alterare le condizioni ambientali, siano esse acquatiche o meno. Se nei laghi o nei mari vengono riversate quantità cospicue di sostanze organiche particolarmente nutrienti e ricche di azoto e fosforo, la crescita rapida e abnorme di alghe produce il fenomeno dell'eutrofizzazione.

Le iniziative messe in atto per far fronte al problema dell'inquinamento delle acque, in particolare il monitoraggio della situazione anche attraverso sofisticate apparecchiature satellitari, e la disponibilità ad accordi di tutela tra Paesi rivieraschi per limitare l'urbanizzazione delle coste, aspetto da tenere in grande considerazione in previsione dell'innalzamento dei mari, sono ancora insufficienti. È necessario intensificare il controllo e il coordinamento delle opere di depurazione delle acque di scolo; soprattutto, occorre installare nuovi depuratori e vegliare costantemente sull'efficienza di quelli esistenti. Non c'è dubbio che è poi necessario continuare con maggior vigore la strada già intrapresa con la creazione e la tutela di aree protette, parchi marini e fluviali. Anche in questo caso, il contributo del singolo ha la sua importanza: quantomeno consente di non aggravare la situazione, ad esempio limitando l'uso dei detersivi quando ciò è possibile (come nel caso del lavaggio dei piatti recuperando l'acqua di cottura della pasta), e preferendo in ogni caso sostanze meno aggressive; utilizzando contenitori di carta anziché di plastica ecc.

La parte più superficiale della litosfera, il suolo, è anch'essa una risorsa vitale. Il suo progressivo impoverimento è un dato di fatto. Il prelievo selvaggio di ghiaia, di sabbie e di argilla, la deforestazione, hanno creato una situazione di dissesto e di erosione molto seria: milioni di tonnellate di sedimenti erosi si depositano nei laghi e nei fiumi accentuando pericolosamente la possibilità di straripamenti e alluvioni, frane e smottamenti. Solo in Italia si contano oltre tremila aree a rischio e il censimento non è da considerarsi definitivo. Le conseguenze economiche del degrado sono pesanti: su oltre un terzo della superficie terrestre si registra una forte diminuzione della fertilità dei terreni e, di conseguenza, della quantità e qualità dei raccolti agricoli. I provvedimenti adottati dalle nazioni interessate si muovono sul piano della conoscenza, individuazione e controllo delle zone a rischio, nonché dell'istituzione di aree di tutela del paesaggio e di parchi naturali. Ma occorre andare oltre e investire concretamente in piani di recupero e messa in sicurezza, a partire dall'opera di riforestazione, la messa in cantiere di strutture di contenimento, reti di protezione e ripulitura periodica dei corsi d'acqua. La prevenzione, l'intervento programmato sul territorio è sicuramente la strategia vincente da perseguire perché efficace ed economica: basti pensare che le emergenze cui solo in Italia si deve far fronte hanno un costo sei volte maggiore rispetto a quanto si spende in via preventiva. Ciò significa anche provvedere al ripristino, per quanto possibile, delle aree di estrazione, alla limitazione dell'apertura di nuove sedi stradali.

Se l'obiettivo di innescare un circolo virtuoso tra ambiente e sviluppo passa necessariamente dalla tutela e razionalizzazione dell'uso delle risorse, non c'è dubbio che la possibilità di utilizzare proficuamente ogni genere di scarto, cioè i rifiuti, si inserisce perfettamente nella strategia perseguita. Rendere i rifiuti una risorsa è un aspetto non marginale cui ogni nazione è chiamata a dare il suo contributo. Lo sforzo condotto in questa direzione inizia a essere apprezzabile, specie nei Paesi industrializzati dove, peraltro per ovvi motivi, la consapevolezza del problema è particolarmente diffusa. Le campagne condotte per sensibilizzare la raccolta differenziata del materiale di scarto e gli investimenti per il suo riciclaggio, spesso in vista della creazione di energia, sia essa calore o elettricità, stanno dando i primi frutti. Sprecare di meno resta sempre, comunque, un impegno che deve essere riconosciuto tale e perseguito.

Ancora per molto tempo, specie se lo sguardo è rivolto ai Paesi del Terzo mondo in via di sviluppo, il combustibile fossile dominerà il

mercato. Ciò non toglie che, di pari passo, lo sviluppo delle nuove tecnologie, quali quella solare ed eolica, dovrà certamente, e in misura crescente, render meno stretta la morsa in cui siamo costretti; il tal senso il piano presentato dall'Enea per quanto riguarda lo sviluppo della tecnologia solare nel meridione d'Italia è sicuramente un buon esempio. Naturalmente, quando si deve fare i conti con i grandi quantitativi di energia non si può escludere l'apporto che la tecnologia nucleare è già ora in grado di offrire con i reattori autofertilizzanti al torio e che, sempre che la ricerca sia adeguatamente sostenuta, potrà rappresentare una svolta decisiva al problema allorché si riuscirà a ottenere la fusione nucleare controllata. Per il momento, razionalizzare l'energia significa anzitutto migliorare l'efficienza tanto sul piano della produzione che su quello della distribuzione e utilizzazione, ma anche operare scelte mirate per diversificare sempre di più, dove le condizioni lo rendono praticabile, le fonti energetiche nella prospettiva di ottenere energia sempre più pulita e sempre meno sprechi.

Che la strada del risparmio energetico sia non solo percorribile ma anche efficace è provato da quanto è stato possibile mettere in opera a Los Angeles. Con l'assunzione di pochi ma coerenti comportamenti i cittadini della metropoli californiana sono riusciti non solo a render meno pesante la loro bolletta energetica, ma hanno dimostrato che è possibile scongiurare le frequenti interruzioni nell'erogazione dell'energia elettrica a causa di una domanda eccessiva rispetto alla capacità della rete. Che cosa significhi restare per molte ore privi di elettricità in un ambiente cittadino o metropolitano è stato provato ed esperito anche in Italia nel settembre 2003 quando, per motivi di diversa natura, l'intera penisola si è trovata isolata e incapace di organizzare un'efficace opera di ripristino delle normali attività. L'evento la dice lunga non solo sulla nostra dipendenza energetica, ma anche sul grado di consapevolezza che ciascuno deve misurare sulla necessità di servirsi oculatamente di un bene così prezioso. L'esempio californiano conferma infine che semplici buone abitudini, come illuminare gli ambienti solo quando è necessario, utilizzare lampade fluorescenti, evitare assolutamente stufe elettriche ecc., assumono un significato che va ben oltre il simbolico.

CONSIDERAZIONI ETICHE

Che l'interrogativo etico, quello che considera l'agire e il comportamento dell'essere umano, vada ben oltre il rapporto che l'uomo, in quanto animale razionale dotato di coscienza e di libertà, ha con se stesso e con gli altri, è ormai un dato di fatto. Il problema morale investe in modo diretto la modalità attraverso la quale l'uomo si relaziona con la stessa realtà esterna e con le altre forme di vita che, di questa realtà, fanno parte. Perché?

La risposta va cercata non nelle pieghe di una constatazione imposta da una convinzione ampiamente condivisa e divenuta quasi una moda, ma nei motivi che ne stanno a fondamento e che ne giustificano la rilevanza.

Nella realtà naturale noi vediamo la costituzione di un ordine ben strutturato e, come tale, accessibile e conoscibile dal nostro intelletto e dalla nostra ragione. L'intelligenza e la razionalità ci spingono a riconoscere che, in un certo qual modo, vi è una reciprocità e una dipendenza tra l'uomo e il sistema naturale, l'ambiente in cui è inserito e vive. Se l'uomo dipende dall'ambiente, quest'ultimo sembra in parte dipendere, almeno per quanto riguarda il suo equilibrio, dall'attività che l'uomo vi svolge. Far piena luce su questa dipendenza, così ben evidenziata dai rapporti tra l'energia e l'ambiente, non è solo un'esigenza speculativa ardua e attraente, giacché il piacere della conoscenza per se stessa eleva ancor più l'individuo nella sua umanità e lo fa crescere nella dimensione della sua libertà; tale dipendenza è anche un'urgenza pratica: affrontarla è doveroso nei riguardi di noi stessi e degli altri! Questo *principio di responsabilità*, diretta emanazione della libertà e di ogni atto volontario, deve essere affermato con forza, a maggior ragione quando l'umanità in generale, e la scienza in particolare, sono chiamate a rispondere a sfide cruciali, quale quella innescata dalle conseguenze di un innalzamento globale della temperatura terrestre. Tale principio si spinge infatti oltre il riconoscimento dei diritti individuali, dal momento che considera come primo il dovere di tutela che ciascun individuo ha nei riguardi

di tutti coloro sulla cui vita può influire direttamente o indirettamente attraverso le proprie azioni.

A fronte di molte, forse troppe incertezze, una cosa è infatti assolutamente certa: indietro non si può tornare. Gli attuali livelli di benessere materiale (quantità di beni a disposizione) e di qualità della vita, di cui potrà godere in prospettiva l'intera umanità, rappresentano un valore non negoziabile. Ciò significa, come è agevole dedurre stante la situazione attuale, incremento della domanda di energia, del resto già prevista doppia del livello di consumo corrente nel 2050, e conseguente possibile aggravamento dei fattori responsabili del degrado ambientale, cioè delle varie forme di inquinamento, in generale, e di quelle che, in particolare, sono considerate alla base del fenomeno dell'incremento termico della Terra. Cosa fare?

Se indietro non si può tornare, se dobbiamo guardare avanti, ciò non vuol dire lasciare implicitamente le cose come sono, conservare lo status quo nella speranza che la natura stessa provveda totalmente ai danni di cui certo non è responsabile, ma neppure limitarsi a prospettare iniziative di emergenza ogni qualvolta si è di fronte all'ennesimo disastro ambientale, con o senza perdita di vite umane. Al contrario, è doveroso assumere consapevolmente precise iniziative inserite in un quadro progettuale globale, accompagnate da comportamenti individuali e collettivi ispirati da un significativo *cambiamento della mentalità*. Questa consapevolezza, che fatica non poco a imporsi alla comprensione e alla condivisione operosa, sta tutta in una nozione che, seppur timidamente ma fortunatamente con continuità, è proposta all'attenzione dell'opinione generale: il concetto di *sviluppo sostenibile*. Si tratta, in buona sostanza, di elaborare e perseguire, con un vincolo che deve assumere sempre più i caratteri dell'urgenza e della necessità, un modello di sviluppo che consenta una crescita economica in grado di non compromettere l'integrità degli ecosistemi e la loro potenzialità di soddisfare i bisogni delle generazioni future.

I principi cardine su cui si fonda il concetto di sviluppo sostenibile risalgono al 1972, anno in cui ebbe luogo l'assemblea internazionale ormai nota come Conferenza di Stoccolma. In quella sede si riconobbe esplicitamente: da un lato, che l'uomo è il *soggetto responsabile primario* della protezione e del miglioramento dell'ambiente Terra nei riguardi dell'attuale generazione umana e di quelle future; dall'altro, che le risorse naturali del pianeta necessitano di salvaguardia e tutela attraverso una programmazione adeguata e attenta, tesa addirittura

a migliorare la capacità del sistema naturale di produrre risorse rinnovabili. Poco più di un decennio dopo Stoccolma, l'Organizzazione delle nazioni unite istituiva formalmente una commissione deputata a indagare una soluzione realistica e percorribile al problema del soddisfacimento dei bisogni primari per una popolazione mondiale in continua crescita. Al termine dei lavori la commissione evidenziò alcune priorità, due delle quali, in particolare, segneranno le tappe di un percorso che, almeno sul piano della sensibilizzazione, ha ottenuto alcuni risultati importanti. La prima urgenza consisteva nell'esame delle più pressanti questioni ambientali e la creazione di nuove forme di cooperazione internazionale in modo di far fronte, sul terreno globale, a ogni specifico problema. La seconda urgenza si riassumeva in un invito a operare in modo da innalzare il grado di consapevolezza del problema ambientale ed educare in tal senso i responsabili politici e amministrativi, nonché i semplici cittadini, a un maggiore impegno e partecipazione attiva. In questa direzione, nel 1989 le Nazioni unite convocarono la Conferenza su *Ambiente e sviluppo* e, tre anni più tardi, la Conferenza mondiale sullo stesso tema, con sede a Rio de Janeiro.

Lo scopo dell'iniziativa Onu, la cui eco è tutt'ora presente, era chiaro: si trattava di individuare strategie praticabili ed efficaci per riuscire a conciliare le esigenze dei Paesi poveri e quelle dei Paesi industrializzati. Il documento finale della Conferenza di Rio, denominato Agenda 21, può essere considerato un sicuro punto di riferimento per il prosieguo di una riflessione che intenda tener conto della nozione di sviluppo globale sostenibile nel XXI secolo. Nel dicembre del 1997, a Kyoto, la comunità internazionale è tornata a discutere nuovamente di problematiche ambientali e, in particolare, del riscaldamento globale del pianeta sulla base del contributo offerto dall'Ipcc che, come abbiamo avuto modo di segnalare, aveva iniziato la sua attività nel 1988. Ma se a Rio de Janeiro furono semplicemente indicati i caratteri generali a cui le singole nazioni partecipanti avrebbero potuto, ma non necessariamente dovuto, attenersi, in terra giapponese è stato stilato un vero e proprio protocollo con obiettivi precisi e vincolanti; per esempio, i Paesi industrializzati e la maggior parte di quelli dell'Europa orientale sono impegnati a ridurre del 5% le principali emissioni dei gas "serra" nel periodo 2008-2010.

Che nel complesso i risultati raggiunti possano apparire insoddisfacenti, se commisurati all'urgenza e all'ampiezza di una risposta che deve essere necessariamente molto articolata e globale, non toglie

che un primo importante obiettivo, quello di focalizzare l'attenzione dell'opinione pubblica mondiale e dei governi delle nazioni, è stato colto. Si tratta di continuare su questa strada, *tenendo alta la tensione tanto sul problema quanto sul principio di responsabilità* individuale e collettiva applicando i necessari correttivi con gli strumenti e i mezzi attualmente disponibili.

La nozione di sviluppo sostenibile si fonda sulla concreta realizzazione di uno sfruttamento e di una gestione razionale delle risorse ambientali, tali da soddisfare i bisogni fondamentali dell'umanità. I criteri da seguire per raggiungere un simile traguardo sono noti: anzitutto la conservazione dell'equilibrio generale, il che significa intervenire preventivamente per evitare l'esaurimento delle riserve naturali e diminuire sensibilmente e costantemente la produzione di rifiuti; in secondo luogo, razionalizzare la produzione e il consumo dell'energia; infine, operare una distribuzione e un uso delle risorse il più possibile equo tra le nazioni e le regioni del pianeta.

Sappiamo che l'ambiente Terra può essere considerato come un unico grande sistema nel quale i tre grandi domini, l'atmosfera, l'idrosfera e la litosfera interagiscono tra loro e rendono di fatto possibile la vita del quarto dominio, quello appunto della biosfera. Sono perfettamente noti anche i problemi che, dominio per dominio, giungono a minacciare più che seriamente l'intero sistema.

Nei riguardi dell'atmosfera, le responsabilità delle attività umane chiamate in causa non solo per il progressivo innalzamento della temperatura terrestre ma anche per le sostanze inquinanti, veleni, che mettono in pericolo la vita e producono smog, piogge acide ecc., sono sufficientemente definite. Che cosa si sta facendo? I Paesi firmatari della convenzione sui cambiamenti climatici stipulata a Rio de Janeiro si sono accordati sull'esigenza di interventi di due tipi: quelli relativi all'acquisizione costante di informazioni climatiche (monitoraggio), e quelli rivolti al settore energetico, specie per quanto riguarda i trasporti e la piaga del depauperamento dei serbatoi naturali di CO₂.

Per prima cosa, sono stati definiti e fissati i valori considerati provvisoriamente accettabili degli elementi inquinanti presenti nell'aria e, in particolare, quelli che si ritiene influiscano come gas "serra". Dopo aver potenziato le reti di rilevamento sono state elaborate strategie e provvedimenti per tentare di ricondurre i valori delle sostanze incriminate entro i limiti stabiliti. Molti interventi hanno riguardato il controllo degli inquinanti che derivano direttamente dal

processo di combustione, cioè i gas di scarico degli automezzi, i fumi degli impianti di riscaldamento e di quelli industriali. L'obbligo delle marmitte catalitiche per gli autoveicoli rientra in queste misure d'intervento: se pienamente efficiente, il dispositivo catalitico rende inattivi i fumi più pericolosi riducendo in particolare le emissioni di monossido di carbonio (CO). Analogo provvedimento sarebbe auspicabile anche per i motocicli e le motociclette. In questa direzione è sembrata andare anche la sostituzione delle benzine con elevate percentuali di piombo, benché un simile provvedimento non sia esente da giustificate critiche non tanto nel metodo quanto nel merito, ossia nei riguardi del combustibile scelto come sostituto. In effetti, la cosiddetta benzina verde non contiene piombo (che è grigio), ma in compenso è ricca di idrocarburi aromatici, tra i quali figura il benzene, che vengono emessi dai gas di scarico e sono estremamente dannosi per la salute umana. Si tenga presente che il benzene è riconosciuto come sostanza potenzialmente cancerogena e che nelle città con una popolazione superiore ai 150.000 abitanti le sue concentrazioni superano da due a tre volte i limiti consentiti, attualmente di 10 microgrammi per ogni metro cubo di aria.

Gli incentivi previsti in merito alla sostituzione del gasolio per uso domestico con il gas metano e la crescente diffusione capillare della rete di distribuzione sta riducendo notevolmente la quantità di anidride solforosa immessa nell'atmosfera.

Assai più complesso da gestire è il problema del controllo degli inquinanti emessi dall'industria, anche perché il fenomeno delle piogge acide si verifica a distanze anche considerevoli dal luogo di produzione ed emissione dei fumi tossici. La vigente normativa in materia di sicurezza sul lavoro, oltre che ambientale, potrebbe costituire un effettivo sostegno sul piano dei controlli, in particolare per quanto riguarda il settore petrolchimico.

Nonostante tutto, in determinati periodi dell'anno, con il favore di particolari condizioni ambientali quali il perdurare dell'alta pressione e l'assenza di ventilazione, si è ancora costretti a ricorrere a misure straordinarie, come la chiusura totale o parziale delle città al traffico veicolare, allorché i parametri fissati per le polveri sottili in sospensione e le particelle di metalli pesanti superano i livelli di guardia. Segno che non molto, ma moltissimo resta ancora da fare tanto sul piano dell'educazione ambientale, cioè della consapevolezza del valore dell'ambiente in cui viviamo, quanto su quello concreto e operativo, ossia l'assunzione vera e propria del *principio di*

responsabilità. Del resto, al di là dei controlli ufficiali, con una semplice operazione è possibile stabilire in modo sufficientemente attendibile quanto smog respiriamo nell'ambiente che maggiormente frequentiamo. Se esponiamo un drappo di tessuto bianco per un mese a una delle finestre della nostra abitazione, vi si depositeranno in media circa 20 grammi di polvere normalmente dispersa nell'aria. La contaminazione fa assumere al tessuto una particolare colorazione grigiastrea. Il confronto della colorazione acquisita dal nostro drappo originariamente bianco con una scala cromatica di riferimento, facilmente reperibile presso le associazioni o gli enti che si occupano di ambiente, evidenzia il grado di eventuale inquinamento con un debolissimo margine di errore.

Non solo si deve, ma si può fare molto di più. Prendiamo il caso dell'Italia, per certi aspetti paradigmatico nel panorama europeo. Ebbene, nel nostro Paese il trasporto delle merci avviene per l'80% su gomma, cioè con l'ausilio di grandi automezzi che emettono notevoli quantità di gas di scarico, quindi CO₂ ecc. Per unità di merce trasportata, il treno produce meno di un decimo delle emissioni inquinanti di un Tir. Per questo motivo è stata avanzata la proposta, che strategicamente avrebbe avuto senso adottare almeno cinquant'anni fa, di limitare drasticamente il traffico delle merci su strada favorendo quello su rotaia, ossia il trasporto ferroviario. Ciò significherebbe, è vero, affrontare ristrutturazioni e iniziative infrastrutturali di un certo peso economico, ma è giocoforza che ciò si verifichi, e non solo nel settore dei trasporti terrestri. L'automobile elettrica, del resto, non è una fantasia ma un mezzo che già ora può essere sostenuto e propagandato: eventuali sgravi fiscali tanto per le industrie costruttrici, che così potrebbero investire in ulteriore ricerca, quanto per i proprietari di parchi macchine di interesse pubblico, come gli enti locali e i ministeri per non parlare dei trasporti, potrebbero rappresentare un buon esempio da estendere anche al settore privato rispetto ai pochi casi esistenti.

Limitare le emissioni nocive derivanti dalla combustione di prodotti fossili è un compito che, in ogni caso, ciascuno può personalmente assumere adottando pochi ed elementari comportamenti. La perfetta efficienza del motore della nostra autovettura o dello scooter sono il risultato di periodici controlli di messa a punto e di revisione, peraltro già previsti dalla legislazione per i veicoli che superano un certo numero di anni, che contribuiscono a limitare l'inevitabile inquinamento del mezzo. A questo primo passo ne può se-

guire un secondo, assai più significativo: quello di decidere di spostarsi facendo a meno dei veicoli a motore tradizionale o, comunque, utilizzando al massimo il servizio pubblico. Un altro semplice accorgimento è quello di limitare il riscaldamento nelle nostre abitazioni e ridurre il consumo di prodotti industriali che richiedono l'impiego di combustibili fossili, come pure installare caldaie domestiche dopo aver accuratamente valutato le diverse tipologie, dando priorità ai modelli che garantiscono minor consumo e maggiore controllabilità: è questo un modo indiretto di invitare le case costruttrici a progettare nuove soluzioni meno inquinanti. Quando le condizioni lo consentono, l'opzione dovrebbe ovviamente orientarsi su generatori di calore solare.

L'inquinamento dell'aria ha indubbiamente dimensioni globali e il suo controllo va ben oltre l'impegno del singolo. Tuttavia, oltre ai comportamenti suggeriti come esempio, grande rilievo può ricoprire l'onere educativo nei confronti delle giovani generazioni. Sarebbe peraltro auspicabile che l'educazione ambientale entrasse stabilmente nella formazione dell'individuo, a partire dall'infanzia. Non si deve del resto dimenticare che proprio i bambini sono i più esposti agli effetti degli inquinanti prodotti dal traffico veicolare.

Sensibilizzare al problema ambientale significa anche informare che l'equilibrio che stiamo pericolosamente perdendo può essere recuperato anche facendo affidamento sulle potenzialità proprie della natura e, in tal senso, tutelarle e renderle pienamente attive. Vi sono ad esempio dei vegetali, quali l'azolla, una particolare specie di felce acquatica, in grado di assorbire piombo, cadmio, rame e zinco. La coltivazione e l'impianto di vegetali di questo tipo in particolari aree a rischio contribuisce sensibilmente a purificare l'aria, nonché al rimboschimento della zona interessata, aspetto anche questo cruciale perché direttamente implicato nel contenimento di CO₂. I boschi, le foreste e la vegetazione in generale sono, come sappiamo, un grande e fondamentale serbatoio di anidride carbonica, come del resto le torbiere, cioè i grandi depositi di vegetali non decomposti. Proprio queste ultime devono essere particolarmente tutelate perché hanno la caratteristica di trattenerne anidride carbonica; la loro presenza, che è distribuita su almeno 5 milioni di chilometri quadrati, deve essere salvaguardata.

Rispetto all'atmosfera, la situazione degli altri due domini fondamentali per la vita, quello dell'acqua e quello del suolo, non è meno preoccupante, esposti anch'essi come sono alle conseguenze dell'innalzamento della temperatura del pianeta.

Che l'acqua sia la risorsa vitale per eccellenza lo sappiamo bene. Ciò di cui è invece necessario prender coscienza, in vista di una sostanziale modifica dei comportamenti e dei piani relativi al suo sfruttamento, è che l'acqua è un bene la cui disponibilità è limitata per due ordini di motivi. Il primo limite è dovuto all'incedere di eventi fisici come la siccità e la progressiva desertificazione di vaste zone del pianeta, che subirà ulteriori incrementi in relazione all'aumento della temperatura, dovuta a uno sfruttamento eccessivo e spesso sconsiderato della risorsa. Il secondo limite è chiaramente imputabile all'accanita opera di deforestazione, di disboscamento intensivo specie nell'area tropicale, che riduce il vapore acqueo nell'atmosfera e la quantità di precipitazioni che favoriscono la crescita della vegetazione. Si tratta di una limitazione che ha gravi ripercussioni anche sul suolo. A completare un quadro non certo incoraggiante interviene poi il livello di inquinamento che, a partire dai torrenti e dai fiumi, finisce per interessare i laghi e i mari destabilizzando gli equilibri esistenti e procurando, anche in questo dominio, gravissimi danni alla biodiversità. È opportuno ricordare che anche le sostanze cosiddette biodegradabili contribuiscono ad alterare le condizioni ambientali, siano esse acquatiche o meno. Se nei laghi o nei mari vengono riversate quantità cospicue di sostanze organiche particolarmente nutrienti e ricche di azoto e fosforo, la crescita rapida e abnorme di alghe produce il fenomeno dell'eutrofizzazione.

Le iniziative messe in atto per far fronte al problema dell'inquinamento delle acque, in particolare il monitoraggio della situazione anche attraverso sofisticate apparecchiature satellitari, e la disponibilità ad accordi di tutela tra Paesi rivieraschi per limitare l'urbanizzazione delle coste, aspetto da tenere in grande considerazione in previsione dell'innalzamento dei mari, sono ancora insufficienti. È necessario intensificare il controllo e il coordinamento delle opere di depurazione delle acque di scolo; soprattutto, occorre installare nuovi depuratori e vegliare costantemente sull'efficienza di quelli esistenti. Non c'è dubbio che è poi necessario continuare con maggior vigore la strada già intrapresa con la creazione e la tutela di aree protette, parchi marini e fluviali. Anche in questo caso, il contributo del singolo ha la sua importanza: quantomeno consente di non aggravare la situazione, ad esempio limitando l'uso dei detersivi quando ciò è possibile (come nel caso del lavaggio dei piatti recuperando l'acqua di cottura della pasta), e preferendo in ogni caso sostanze meno aggressive; utilizzando contenitori di carta anziché di plastica ecc.

La parte più superficiale della litosfera, il suolo, è anch'essa una risorsa vitale. Il suo progressivo impoverimento è un dato di fatto. Il prelievo selvaggio di ghiaia, di sabbie e di argilla, la deforestazione, hanno creato una situazione di dissesto e di erosione molto seria: milioni di tonnellate di sedimenti erosi si depositano nei laghi e nei fiumi accentuando pericolosamente la possibilità di straripamenti e alluvioni, frane e smottamenti. Solo in Italia si contano oltre tremila aree a rischio e il censimento non è da considerarsi definitivo. Le conseguenze economiche del degrado sono pesanti: su oltre un terzo della superficie terrestre si registra una forte diminuzione della fertilità dei terreni e, di conseguenza, della quantità e qualità dei raccolti agricoli. I provvedimenti adottati dalle nazioni interessate si muovono sul piano della conoscenza, individuazione e controllo delle zone a rischio, nonché dell'istituzione di aree di tutela del paesaggio e di parchi naturali. Ma occorre andare oltre e investire concretamente in piani di recupero e messa in sicurezza, a partire dall'opera di riforestazione, la messa in cantiere di strutture di contenimento, reti di protezione e ripulitura periodica dei corsi d'acqua. La prevenzione, l'intervento programmato sul territorio è sicuramente la strategia vincente da perseguire perché efficace ed economica: basti pensare che le emergenze cui solo in Italia si deve far fronte hanno un costo sei volte maggiore rispetto a quanto si spende in via preventiva. Ciò significa anche provvedere al ripristino, per quanto possibile, delle aree di estrazione, alla limitazione dell'apertura di nuove sedi stradali.

Se l'obiettivo di innescare un circolo virtuoso tra ambiente e sviluppo passa necessariamente dalla tutela e razionalizzazione dell'uso delle risorse, non c'è dubbio che la possibilità di utilizzare proficuamente ogni genere di scarto, cioè i rifiuti, si inserisce perfettamente nella strategia perseguita. Rendere i rifiuti una risorsa è un aspetto non marginale cui ogni nazione è chiamata a dare il suo contributo. Lo sforzo condotto in questa direzione inizia a essere apprezzabile, specie nei Paesi industrializzati dove, peraltro per ovvi motivi, la consapevolezza del problema è particolarmente diffusa. Le campagne condotte per sensibilizzare la raccolta differenziata del materiale di scarto e gli investimenti per il suo riciclaggio, spesso in vista della creazione di energia, sia essa calore o elettricità, stanno dando i primi frutti. Sprecare di meno resta sempre, comunque, un impegno che deve essere riconosciuto tale e perseguito.

Ancora per molto tempo, specie se lo sguardo è rivolto ai Paesi del Terzo mondo in via di sviluppo, il combustibile fossile dominerà il

mercato. Ciò non toglie che, di pari passo, lo sviluppo delle nuove tecnologie, quali quella solare ed eolica, dovrà certamente, e in misura crescente, render meno stretta la morsa in cui siamo costretti; il tal senso il piano presentato dall'Enea per quanto riguarda lo sviluppo della tecnologia solare nel meridione d'Italia è sicuramente un buon esempio. Naturalmente, quando si deve fare i conti con i grandi quantitativi di energia non si può escludere l'apporto che la tecnologia nucleare è già ora in grado di offrire con i reattori autofertilizzanti al torio e che, sempre che la ricerca sia adeguatamente sostenuta, potrà rappresentare una svolta decisiva al problema allorché si riuscirà a ottenere la fusione nucleare controllata. Per il momento, razionalizzare l'energia significa anzitutto migliorare l'efficienza tanto sul piano della produzione che su quello della distribuzione e utilizzazione, ma anche operare scelte mirate per diversificare sempre di più, dove le condizioni lo rendono praticabile, le fonti energetiche nella prospettiva di ottenere energia sempre più pulita e sempre meno sprechi.

Che la strada del risparmio energetico sia non solo percorribile ma anche efficace è provato da quanto è stato possibile mettere in opera a Los Angeles. Con l'assunzione di pochi ma coerenti comportamenti i cittadini della metropoli californiana sono riusciti non solo a render meno pesante la loro bolletta energetica, ma hanno dimostrato che è possibile scongiurare le frequenti interruzioni nell'erogazione dell'energia elettrica a causa di una domanda eccessiva rispetto alla capacità della rete. Che cosa significhi restare per molte ore privi di elettricità in un ambiente cittadino o metropolitano è stato provato ed esperito anche in Italia nel settembre 2003 quando, per motivi di diversa natura, l'intera penisola si è trovata isolata e incapace di organizzare un'efficace opera di ripristino delle normali attività. L'evento la dice lunga non solo sulla nostra dipendenza energetica, ma anche sul grado di consapevolezza che ciascuno deve misurare sulla necessità di servirsi oculatamente di un bene così prezioso. L'esempio californiano conferma infine che semplici buone abitudini, come illuminare gli ambienti solo quando è necessario, utilizzare lampade fluorescenti, evitare assolutamente stufe elettriche ecc., assumono un significato che va ben oltre il simbolico.

GENETICA

1. La cellula

C'è qualcosa che, nonostante tutte le differenze più o meno pronunciate, potremmo indicare come il comune denominatore di tutti gli esseri viventi? La risposta è sì. Che si tratti di batteri, di piante, di animali, l'elemento base che accomuna tutte queste forme di vita si chiama cellula. I virus e i prioni sono considerati al confine tra viventi e non viventi proprio perché non mostrano alcuna organizzazione cellulare. La cellula è la più piccola unità di un organismo in grado di esprimere autonomamente le proprie funzioni; un essere umano adulto ne conta migliaia di miliardi.

Tutti gli esseri viventi sono dunque costituiti da una o più cellule, sicché si distinguono in:

- organismi unicellulari, di cui fanno parte gli archeobatteri, gli eubatteri, le alghe azzurre e i protozoi;
- organismi pluricellulari, di cui fanno parte le piante, gli animali, i funghi pluricellulari e alcuni gruppi di alghe. In questi organismi, le cellule si coordinano originando diversi e crescenti livelli di organizzazione in cui ogni elemento ha capacità diverse rispetto all'elemento del livello che lo precede. Così dai tessuti, le cui cellule svolgono specifiche funzioni, si passa agli organi, costituiti da più tessuti, anch'essi con funzioni determinate, e dagli apparati, in cui diversi organi interagiscono, si giunge all'organismo.

Le dimensioni e la forma delle cellule sono diverse. Si va dalle cellule batteriche (circa 1 milionesimo di metro) alle cellule dei tessuti animali (tra i 10 e i 20 milionesimi di metro), la cui forma varia in base alle funzioni svolte. Le cellule nervose hanno ad esempio una forma stellata con sottilissimi prolungamenti. Le cellule vegetali (tra i 20 e i 30 milionesimi di metro e oltre) sono generalmente poliedriche.

La cellula, potremmo dire, è una specie di centrale di comando alla quale fanno capo tutti i processi vitali dell'organismo, tutte le comunicazioni fondamentali che consentono il funzionamento di ogni essere vivente e, come tale, la sede di reazioni chimiche che ne consentono la crescita, la produzione dell'energia necessaria e lo smaltimento delle scorie prodotte. Tutte queste attività prendono il nome di metabolismo. E tutte queste reazioni avvengono nella cellula attraverso l'opera di speciali catalizzatori costituiti da molecole proteiche: gli *enzimi*.

Alla base della cellula vi sono infatti le *molecole*, che possono essere considerate come la più piccola porzione di sostanza che, della stessa, conserva tutte le proprietà. Naturalmente, ogni molecola è costituita da atomi di uno stesso elemento o di elementi diversi; per questo motivo, le molecole si distinguono in biatomiche, se costituite da due atomi, e in poliatomiche, se costituite da più di due atomi. Molecole complesse possono assumere diverse forme, ad esempio a catena, ad anello, a elica.

Le molecole hanno un ruolo ben preciso: portare l'informazione tra le cellule consentendone così l'interazione. I principali tipi di molecole organiche che compongono la cellula sono: proteine, carboidrati, grassi e acidi nucleici.

Le *proteine* (dal greco *proteios*, cioè primario), sono gli elementi costitutivi predominanti della cellula: i muscoli, il cervello, il cuore, lo stomaco, sono costituiti in gran parte di proteine, così come il sangue e le stesse ossa. In ogni forma di vita, le proteine sono formate da una sequenza di 20 unità di amminoacidi diversi, in proporzioni determinate. A loro volta, gli amminoacidi sono composti di carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto. I vegetali producono interamente gli amminoacidi a partire dall'acqua, dall'anidride carbonica, dall'azoto e da altre sostanze attraverso la fotosintesi; la maggior parte degli altri organismi ne fabbrica solo una parte, 12 su 20 per l'esattezza; i rimanenti 8 amminoacidi, nei mammiferi, devono essere ricavati per via alimentare.

Le molecole proteiche, le cui dimensioni sono notevoli come il loro numero (si stima che nell'essere umano ne siano presenti circa 100.000 unità diverse), possono presentare una forma fibrosa o globulare. Nel primo caso, le molecole proteiche svolgono generalmente funzioni strutturali; nel secondo caso, sono sferoidali, estremamente sottili, e assolvono un ruolo importante nelle reazioni metaboliche cellulari: l'albumina, le globuline, tutti gli enzimi proteici e gli ormoni proteici sono di questo tipo.

L'enzima, in generale, è una struttura molecolare proteica di forma globulare che negli organismi viventi svolge la funzione di catalizzatore biologico, cioè di sostanza in grado di accelerare la velocità di una reazione chimica. Questa capacità è detta potere catalitico, potere in virtù del quale una reazione chimica viene accelerata di un fattore pari a un milione di volte il normale decorso.

Le cellule non sono solo in grado di svolgere reazioni metaboliche ed energetiche, ma anche di riprodursi e, come avremo modo di accertare, di coordinare le proprie funzioni grazie agli acidi nucleici presenti all'interno delle cellule stesse. Sul piano della riproduzione, è opportuno precisare che le cellule non hanno tutte, indifferentemente, la stessa capacità di divisione; quest'ultima, infatti, varia a seconda del tipo al quale appartiene la cellula. In ogni caso, la riproduzione cellulare avviene mediante due processi. Nel primo processo, chiamato mitosi, ciascuna cellula si divide in due cellule figlie che, dal punto di vista genetico e della forma, sono identiche tra loro e con la cellula madre. Il secondo processo, detto meiosi, interessa le cellule sessuali; da una cellula si formano quattro cellule figlie che presentano la metà del patrimonio genetico della cellula originaria. Questi processi sono caratteristici delle cellule dette eucarioti. Se si guarda alla loro organizzazione interna, le cellule possono infatti essere distinte in due grandi categorie: le cellule *procarioti* e le cellule *eucarioti*.

Le cellule procarioti caratterizzano i batteri e le alghe azzurre; sono piccole e mostrano una struttura interna semplice. Gli acidi nucleici sono concentrati in una regione del *citoplasma*, una complessa soluzione acquosa. Non sono quasi presenti strutture membranose, i cosiddetti organuli, oltre i *ribosomi*, preposti alla sintesi delle proteine. Le funzioni cellulari sono svolte da complessi enzimi.

Le cellule eucarioti, caratteristiche delle piante, dei funghi e degli animali, sono notevolmente più grandi delle precedenti e presentano diversi organuli. L'organulo di maggiori dimensioni nelle cellule vegetali e animali è il *nucleo*, importante perché contiene l'acido nucleico, cioè il materiale genetico, gli istoni, proteine presenti in coppie e in numero variabile a seconda del tipo di cellula, e proteine non istoniche. Vi sono poi due organuli particolarmente importanti: i *mitocondri*, che rappresentano la sede del processo di respirazione cellulare attraverso la quale la cellula ricava energia bruciando, in presenza di ossigeno, molecole di glucosio che derivano dalla demolizione delle sostanze nutritive; e *ribosomi* che, come detto, sono preposti alla sin-

tesi delle proteine. Il contenuto della cellula è interamente racchiuso da una membrana di natura semipermeabile, che così forma una specie di barriera tra l'ambiente interno ed esterno alla cellula stessa. Questa membrana è costruita con un doppio strato di molecole di particolari grassi in cui sono immerse numerose proteine. In quanto barriera, la membrana consente la regolazione della composizione chimica della cellula. Data la sua consistenza, le molecole idrosolubili non sono in grado, spontaneamente, di attraversare la membrana; perché ciò sia possibile è necessaria una proteina specifica dotata di una cavità centrale, incuneata nella membrana. Attraverso questo sistema di trasporto, la cellula può mantenere valori interni di concentrazione diversi da quelli dell'ambiente esterno. Infine, la membrana è anche il mezzo attraverso il quale la cellula si fa riconoscere dalle altre cellule, giacché contiene particolari molecole in grado di verificare se tale cellula fa parte dell'organismo stesso o le è estranea, nel qual caso deve essere attaccata e distrutta dal sistema immunitario.

Nelle cellule animali, la membrana non presenta in genere strati esterni di rivestimento; nei batteri e nei vegetali, invece, all'esterno della membrana si trova una parte rigida. Nei batteri, questa struttura ha una funzione protettiva, nei vegetali a quest'ultima si aggiunge anche quella di sostegno e di conservazione della forma tipica. La parete limita i movimenti della cellula così come l'ingresso o la fuoriuscita di materiali.

Gli organuli tipici delle cellule vegetali sono tre:

- la parete, cioè uno strato rigido posto all'esterno della membrana cellulare, è costituita in gran parte da cellulosa;
- i plastidi, organuli di particolare importanza, tra cui i principali sono i cloroplasti, che costituiscono la sede della sintesi clorofilliana e contengono le molecole di clorofilla necessarie al processo;
- il vacuolo, ovvero una cavità delimitata da una membrana, piena di liquido, che svolge varie funzioni metaboliche.

L'efficienza e l'armonia delle diverse funzioni dell'organismo è dovuta ai sistemi di comunicazione esistenti tra le cellule e tra queste e l'ambiente esterno.

Dal punto di vista della loro tipologia, le cellule si dividono in:

- *germinali*;
- *somatiche*.

Le cellule germinali, riproduttive, sono lo spermatozoo e l'ovulo.
Le cellule somatiche si distinguono a loro volta in:

- *differenziate*;
- *staminali*.

Le cellule differenziate costituiscono la maggior parte delle cellule del nostro corpo; tutti i nostri organi, dalla pelle al cervello, sono formati da questa varietà di cellule somatiche differenziate. Tra queste possiamo ulteriormente distinguere:

- cellule soggette al rinnovamento, ovvero cellule che nel corso della vita dell'individuo vengono sostituite a ritmo continuo da nuove cellule, come accade per quelle della cute;
- cellule che non si dividono più allorché l'individuo ha raggiunto la crescita ma che, in determinate circostanze, ad esempio traumi o ferite, possono riprendere la divisione, come avviene per il fegato, la tiroide e il tessuto muscolare liscio;
- cellule, come quelle nervose, che cessano la divisione ancor prima che lo sviluppo dell'organismo sia completato.

Le cellule staminali non sono pienamente differenziate e possono originare altre cellule differenziate dell'organismo. Si distinguono in due tipi:

- staminali embrionali;
- staminali in organismo già formato.

Le cellule staminali embrionali costituiscono l'embrione, cioè il nuovo individuo che si forma in seguito al concepimento, nelle sue primissime fasi. Queste cellule sono dette *totipotenti*, ossia capaci di dar luogo all'intero organismo, con tutte le cellule che lo compongono.

Le cellule staminali in organismo già formato sono presenti soprattutto nel cordone ombelicale e nella placenta, al momento della nascita dell'individuo, o nell'adulto, in particolare nella parte centrale del midollo osseo. Anche queste cellule sono pronte a differenziarsi a seconda dei bisogni dell'organismo. In base alla loro differenziazione, queste cellule staminali sono dette *multipotenti* o *pluripotenti*. Sono multipotenti se capaci di originare solo i diversi tipi di cel-

lule del tronco a cui appartengono; sono pluripotenti se possono dare origine a qualsiasi tipo di cellula dell'organismo, anche se non possono dar luogo a tutto un individuo. Recenti studi hanno dimostrato che alcune cellule staminali provenienti da adulti, trovandosi a contatto con tessuti cellulari diversi dal proprio tronco o gruppo, sviluppano cellule differenziate del tessuto con il quale sono entrate in contatto.

2. I cromosomi

Ogni specie biologica possiede generalmente, fatta eccezione per le piante poliploidi, un numero fisso di cromosomi, cioè strutture che codificano le informazioni che dirigono la crescita delle cellule, la loro differenziazione e strutturazione. I cromosomi possono essere individuati all'interno della cellula solo allorché si è in presenza di un processo di divisione cellulare (mitosi e meiosi); nel corso della normale attività metabolica sono indistinguibili perché agglomerate con l'acido nucleico e le proteine in un ammasso distinguibile (cromatina) nel nucleo degli organismi eucarioti.

I cromosomi sono presenti tanto negli organismi procarioti quanto in quelli eucarioti; nei primi, si riscontra un solo cromosoma circolare; nei secondi, il numero dipende dalla specie ed è detto corredo cromosomico. Ciascun elemento comprende solo una parte del codice genetico dell'individuo e, di conseguenza, ogni elemento è caratterizzato da una determinata sequenza di Dna.

In linea generale, possiamo distinguere i cromosomi in

- cromosomi sessuali
- cromosomi autosomi

A seconda della specie e del sesso, i cromosomi sessuali presenti possono essere ridotti a una singola unità, a due unità o a più di due unità; i batteri e gli organismi simili a essi hanno un solo cromosoma relativamente grande e altri piccoli elementi genetici chiamati *plasmidi*; nell'uomo, il maschio presenta una coppia XY, la femmina una coppia XX. Il corredo cromosomico della specie umana sarà così:

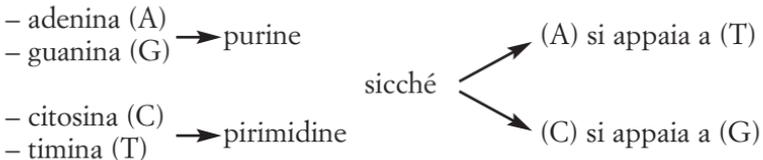
- 22 coppie + XY, per l'individuo maschio;
- 22 coppie + XX, per l'individuo femmina.

Nella formazione dei gameti dell'essere umano, cioè delle cellule germinali maschili e femminili, le cellule ovulo femminili presentano sempre un cromosoma X, mentre gli spermatozoi maschili possono presentare un cromosoma X o Y. La fecondazione di una cellula germinale femminile con una cellula germinale maschile che porta un cromosoma X origina uno zigote (la prima fase di sviluppo dell'embrione) con due X, cioè una femmina (XX). Al contrario, l'unione di una cellula germinale femminile con una maschile che porta un cromosoma Y origina uno zigote XY, cioè un individuo maschio (XY). Su questo schema fondamentale si realizzano numerose variazioni che caratterizzano le altre specie animali e vegetali. Il numero di cromosomi di una cellula o di un individuo può tuttavia variare, rispetto a quello standard, a causa di errori nel processo di meiosi o per l'effetto di agenti in grado di indurre mutazioni genetiche.

3. Il Dna

Ogni cromosoma è formato da un doppio filamento molto lungo di acido desossiribonucleico (Dna) che costituisce i geni dell'organismo per i quali avviene la sintesi delle proteine, molte delle quali sono enzimi. Il Dna è presente in tutti gli esseri viventi eucarioti e procarioti, in alcuni virus e nei prioni.

La struttura del Dna è stata spiegata e rappresentata attraverso un modello a doppia elica. In effetti, ogni molecola di acido desossiribonucleico può essere considerato come una scala a chiocciola i cui montanti o corrimano (i due filamenti) sono composti da una sequenza di molecole di un particolare zucchero, il desossiribosio, e da gruppi di fosfati, mentre i gradini corrispondono perfettamente a coppie di basi azotate, ossia molecole che dal punto di vista chimico appartengono al gruppo delle purine e pirimidine. La loro configurazione è la seguente.



Dal momento che l'adenina (A) si lega sempre e solo con la timina (T), mentre la citosina (C) si lega sempre e solo con la guanina (G),

ogni base si presenta sempre appaiata alla sua complementare. Tutte le basi rappresentano, in via analogica con le lettere che compongono l'alfabeto di una lingua, delle lettere chimiche.

La quantità di Dna per cellula, come pure la lunghezza dei suoi filamenti, varia decisamente a seconda degli organismi: se il Dna di un batterio contiene circa due milioni di basi, il nostro ne contiene circa tre miliardi e mezzo.

In una molecola di Dna, l'insieme:

- base azotata
- molecola di desossiribosio → prende il nome di *nucleotide*
- molecola di fosfato

La sequenza di tre nucleotidi si dice *tripletta* o *codone*, e corrispondono ai diversi amminoacidi; questa particolare proprietà permette la sintesi proteica.

Per avere un'idea delle dimensioni con cui abbiamo a che fare, merita riprendere l'analogia poco sopra delineata a proposito delle lettere chimiche. Se, nel caso dell'essere umano, volessimo trascrivere tutte queste lettere, avremmo bisogno di circa duecento volumi, ciascuno dei quali costituito di mille pagine. Le quattro basi appaiate possono infatti essere considerate come un alfabeto di quattro lettere chimiche che, combinandosi a gruppi di tre paia, formano le triplette, ossia le parole. Naturalmente, le parole possono essere più o meno lunghe in virtù delle combinazioni delle lettere chimiche. Gruppi di triplette collegati tra loro in una sequenza stabilita formano i geni, cioè le frasi. La successione programmata dei geni lungo tutto il Dna forma il *genoma*, il vero e proprio libro dove è scritto tutto il nostro patrimonio genetico.

Il Dna svolge due funzioni fondamentali, coadiuvato dalle proteine:

- la *replicazione*, attraverso la quale il Dna viene fedelmente copiato e trasmesso;
- la *trascrizione*, attraverso la quale si avvia il processo di sintesi delle proteine.

Il Dna è in grado di replicarsi, ossia formare copie della sua stessa molecola, consentendo così i processi di divisione cellulare. Il meccanismo con cui il Dna produce se stesso avviene prima di ogni divisione cellulare sicché le cellule figlie ricevono ciascuna una copia

del patrimonio genetico. Perché ciò accada, ossia per poter duplicare una copia del Dna, i due filamenti della doppia elica modificano la loro geometria e si separano, come se il corrimano di una scala a chiocciola perdesse il suo andamento elicoidale per proporsi semplicemente come quello di una scala dritta. Ciascun filamento del Dna diviene allora una specie di stampo per assemblare nuovi filamenti complementari. Grazie a un enzima particolare, denominato Dna *polimerasi*, a ogni base di ciascun filamento originario, cioè a ogni gradino della scala, si appaiano basi azotate complementari: a ogni (A) si appaia una (T) e a ogni (G) si appaia una (C). È così che vengono a formarsi due nuove coppie di eliche, ciascuna costituita da un vecchio filamento e da uno nuovo.

Come sappiamo, il Dna è sempre strettamente unito a una serie di proteine; occorre inoltre registrare anche la presenza di una molecola molto simile allo stesso Dna, quella dell'acido ribonucleico (Rna), anch'essa presente negli organismi eucarioti e procarioti e in diversi virus. Infatti, la struttura dell'acido ribonucleico presenta una sequenza di molecole di zucchero ribosio e gruppi di fosfati. A ogni molecola di zucchero è legata una base azotata che appartiene, come è facilmente intuibile, alle purine o alle pirimidine. Avremo così:

– adenina (A)	→	purine		– citosina (C)	→	pirimidine
– guanina (G)	→			– uracile (U)	→	

L'unità costituita da:

– base azotata		
– molecola ribosio	→	prende il nome di <i>nucleotide</i>
– molecola di fosfato		

In estrema sintesi, potremo dunque affermare che l'acido ribonucleico o Rna si differenzia dall'acido desossiribonucleico per il fatto che sostituisce la timina (T) con un'altra base azotata simile, cioè l'uracile (U), e, al posto del desossiribosio, presenta un altro zucchero, il ribosio. Quanto detto ci consente di illustrare la seconda funzione fondamentale del Dna, cioè la trascrizione, fase nella quale viene copiato un solo filamento di Dna che dà origine a una singola elica di Rna.

Nel processo di trascrizione, la molecola di Dna con il suo doppio filamento avvolto su se stesso si apre sotto l'azione di determinati enzi-

mi; lo sviluppo è presieduto in particolare da un enzima denominato Rna polimerasi e consiste nell'appaiare le basi (A), (T), (G), (C) con le basi (U), (A), (C), (G), rispettivamente. Il risultato è la produzione di Rna denominato *messaggero* (*mRna*) in quanto identificato come molecola di Rna che porta il messaggio "scritto" sul Dna, e di conseguenza trasferibile dal nucleo, all'apparato cellulare, che poi lo *traduce* in proteine. Detto in altri termini, quanto è scritto sul Dna con l'alfabeto formato dalle lettere (A), (T), (G), (C) viene trascritto con un altro alfabeto costituito dalle lettere (A), (U), (G), (C) e poi tradotto in un'altra lingua, cioè la produzione di proteine, attraverso un terzo alfabeto costituito da venti lettere, ovvero gli amminoacidi. La traduzione avviene nelle cellule mediante un complesso sistema costituito da proteine e Rna in modo tale da far corrispondere, in virtù di un dato codice, un amminoacido a una tripletta di basi azotate. Negli organismi procarioti, dove il cromosoma è libero nel citoplasma, la traduzione può iniziare anche prima che la trascrizione sia completata; negli organismi eucarioti i cromosomi sono isolati nel nucleo e i ribosomi si trovano nel citoplasma, sicché la traduzione di *mRna* nella proteina corrispondente inizia solo allorché il messaggero, prodotto nel nucleo, viene trasferito nel citoplasma.

4. I geni

Il genoma, cioè il corredo ereditario di un organismo, è suddiviso in una molteplicità di frazioni: ogni frazione forma un gene. Considerato singolarmente, e in termini molto approssimativi, il gene è l'unità ereditaria di ogni organismo vivente (procariote o eucariote) e dei virus che controlla la presenza nell'individuo di un determinato carattere e ne permette la trasmissione ai discendenti.

Il genoma umano conta circa 35.000 geni, indubbiamente un numero considerevole. Eppure, tutti questi geni costituiscono solo l'1% del nostro Dna totale. Ora, poiché i geni sono formati dal Dna, in ogni cellula si trovano tutti i geni, cioè l'intero genoma; allo stesso modo, ciascun individuo presenta esattamente gli stessi geni del suo simile, benché ognuno di noi presenti diverse varianti. Queste ultime prendono il nome di *alleli*.

Ci si può legittimamente chiedere come possa accadere che nel patrimonio genetico di una stessa specie vi sia la compresenza di diverse forme degli stessi geni. Ciò è facilmente spiegabile se si considera che il Dna non è statico, immobile; al contrario, esso muta, cambia continuamente:

le quattro basi azotate si sostituiscono l'un l'altra, possono esser tolte o aggiunte, intere sezioni di Dna sono persino capaci di spostarsi autonomamente da una parte all'altra del cromosoma.

La struttura del gene è soggetta a modifica sia per effetto di fenomeni spontanei sia mediante processi artificiali; la modificazione del gene prende il nome di *mutazione* che, dunque, può essere spontanea o indotta.

Ogni essere umano ha due copie di ogni gene; se le copie sono uguali l'individuo in questione è denominato omozigote, in caso contrario, quando cioè le copie di ogni gene sono diverse, l'individuo in questione è detto eterozigote. Non è difficile constatare che, frequentemente, nell'individuo eterozigote uno degli alleli prevale sull'altro: il caso dell'allele per gli occhi neri che domina su quello per gli occhi azzurri è un esempio classico. Spesso ciò accade perché l'allele prevalente ha semplicemente maggiore opportunità di esprimersi, ed è definito *dominante*, mentre l'altro viene indicato come *recessivo*. Tutti i geni del nostro corredo consteranno quindi di una parte eterozigote e una omozigote; dei geni che appartengono alla parte eterozigote sarà in evidenza solo l'allele dominante.

L'insieme dei geni, ovvero quelli dominanti e quelli recessivi, è definito *genotipo*; l'insieme dei caratteri presenti in un individuo è invece detto *fenotipo*.

La corrispondenza tra gene, Rna e proteine si manifesta con una tale perfezione da poter indurre a pensare che, una volta conosciuta la sequenza delle basi del Dna di un organismo, saremo in grado di prevedere in modo certo e sicuro le proteine sintetizzate. Poiché queste ultime sono il vero e proprio materiale su cui si costruisce la vita, ciò significa che dovremmo essere in grado di prevedere, con altrettanta certezza e sicurezza, la forma, le funzioni, insomma la vita di un organismo. La realtà delle cose non è però così lineare, è anzi molto più complicata di quello che sembra. In altri termini, la lettura del Dna presenta considerevoli margini di ambiguità. In primo luogo, la trascrizione di una stessa sequenza di Dna presenta diversi punti iniziali e finali, sicché si crea la possibilità di produrre diversi Rna *messaggero* (*mRna*) e, di conseguenza, proteine diverse; in secondo luogo, i geni non vengono mai trascritti e tradotti tutti insieme in una cellula: si stima che solo 2000, dei circa 35.000 geni che ci appartengono, siano effettivamente presenti e operanti in ogni cellula, e che difficilmente questi geni sono gli stessi in cellule diverse e in tempi diversi.

La composizione e la struttura complessiva delle cellule e degli organismi, che varia anche in organismi che presentano gli stessi geni a seconda delle condizioni in cui vivono, deriva da una rete estremamente intricata di fenomeni. Ciò vuol dire che il fenotipo di un individuo non è unico e stabilito una volta per tutte al momento della nascita dai geni di cui è dotato, ma è il risultato di una serie di fenotipi che variano col tempo, compatibilmente con i processi che possono verificarsi all'interno del genotipo. È infine opportuno sottolineare che alcuni geni hanno un ruolo e un'importanza più rilevante di altri: sono quelli che intervengono inizialmente, e la cui attività è dunque in grado di alterare o render nulla la serie di eventi necessari alla formazione dell'individuo, quali ad esempio i geni materni, o quei geni che possono condizionare nello stesso tempo la trascrizione di molti pezzi di Dna, come ad esempio i geni di animali e piante che conducono alla sintesi degli ormoni. La modificazione di questi geni ha, come è facile capire, effetti molto significativi sul piano dell'imprevedibilità.

GENETICA

1. La cellula

C'è qualcosa che, nonostante tutte le differenze più o meno pronunciate, potremmo indicare come il comune denominatore di tutti gli esseri viventi? La risposta è sì. Che si tratti di batteri, di piante, di animali, l'elemento base che accomuna tutte queste forme di vita si chiama cellula. I virus e i prioni sono considerati al confine tra viventi e non viventi proprio perché non mostrano alcuna organizzazione cellulare. La cellula è la più piccola unità di un organismo in grado di esprimere autonomamente le proprie funzioni; un essere umano adulto ne conta migliaia di miliardi.

Tutti gli esseri viventi sono dunque costituiti da una o più cellule, sicché si distinguono in:

- organismi unicellulari, di cui fanno parte gli archeobatteri, gli eubatteri, le alghe azzurre e i protozoi;
- organismi pluricellulari, di cui fanno parte le piante, gli animali, i funghi pluricellulari e alcuni gruppi di alghe. In questi organismi, le cellule si coordinano originando diversi e crescenti livelli di organizzazione in cui ogni elemento ha capacità diverse rispetto all'elemento del livello che lo precede. Così dai tessuti, le cui cellule svolgono specifiche funzioni, si passa agli organi, costituiti da più tessuti, anch'essi con funzioni determinate, e dagli apparati, in cui diversi organi interagiscono, si giunge all'organismo.

Le dimensioni e la forma delle cellule sono diverse. Si va dalle cellule batteriche (circa 1 milionesimo di metro) alle cellule dei tessuti animali (tra i 10 e i 20 milionesimi di metro), la cui forma varia in base alle funzioni svolte. Le cellule nervose hanno ad esempio una forma stellata con sottilissimi prolungamenti. Le cellule vegetali (tra i 20 e i 30 milionesimi di metro e oltre) sono generalmente poliedriche.

La cellula, potremmo dire, è una specie di centrale di comando alla quale fanno capo tutti i processi vitali dell'organismo, tutte le comunicazioni fondamentali che consentono il funzionamento di ogni essere vivente e, come tale, la sede di reazioni chimiche che ne consentono la crescita, la produzione dell'energia necessaria e lo smaltimento delle scorie prodotte. Tutte queste attività prendono il nome di metabolismo. E tutte queste reazioni avvengono nella cellula attraverso l'opera di speciali catalizzatori costituiti da molecole proteiche: gli *enzimi*.

Alla base della cellula vi sono infatti le *molecole*, che possono essere considerate come la più piccola porzione di sostanza che, della stessa, conserva tutte le proprietà. Naturalmente, ogni molecola è costituita da atomi di uno stesso elemento o di elementi diversi; per questo motivo, le molecole si distinguono in biatomiche, se costituite da due atomi, e in poliatomiche, se costituite da più di due atomi. Molecole complesse possono assumere diverse forme, ad esempio a catena, ad anello, a elica.

Le molecole hanno un ruolo ben preciso: portare l'informazione tra le cellule consentendone così l'interazione. I principali tipi di molecole organiche che compongono la cellula sono: proteine, carboidrati, grassi e acidi nucleici.

Le *proteine* (dal greco *proteios*, cioè primario), sono gli elementi costitutivi predominanti della cellula: i muscoli, il cervello, il cuore, lo stomaco, sono costituiti in gran parte di proteine, così come il sangue e le stesse ossa. In ogni forma di vita, le proteine sono formate da una sequenza di 20 unità di amminoacidi diversi, in proporzioni determinate. A loro volta, gli amminoacidi sono composti di carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto. I vegetali producono interamente gli amminoacidi a partire dall'acqua, dall'anidride carbonica, dall'azoto e da altre sostanze attraverso la fotosintesi; la maggior parte degli altri organismi ne fabbrica solo una parte, 12 su 20 per l'esattezza; i rimanenti 8 amminoacidi, nei mammiferi, devono essere ricavati per via alimentare.

Le molecole proteiche, le cui dimensioni sono notevoli come il loro numero (si stima che nell'essere umano ne siano presenti circa 100.000 unità diverse), possono presentare una forma fibrosa o globulare. Nel primo caso, le molecole proteiche svolgono generalmente funzioni strutturali; nel secondo caso, sono sferoidali, estremamente sottili, e assolvono un ruolo importante nelle reazioni metaboliche cellulari: l'albumina, le globuline, tutti gli enzimi proteici e gli ormoni proteici sono di questo tipo.

L'enzima, in generale, è una struttura molecolare proteica di forma globulare che negli organismi viventi svolge la funzione di catalizzatore biologico, cioè di sostanza in grado di accelerare la velocità di una reazione chimica. Questa capacità è detta potere catalitico, potere in virtù del quale una reazione chimica viene accelerata di un fattore pari a un milione di volte il normale decorso.

Le cellule non sono solo in grado di svolgere reazioni metaboliche ed energetiche, ma anche di riprodursi e, come avremo modo di accertare, di coordinare le proprie funzioni grazie agli acidi nucleici presenti all'interno delle cellule stesse. Sul piano della riproduzione, è opportuno precisare che le cellule non hanno tutte, indifferentemente, la stessa capacità di divisione; quest'ultima, infatti, varia a seconda del tipo al quale appartiene la cellula. In ogni caso, la riproduzione cellulare avviene mediante due processi. Nel primo processo, chiamato mitosi, ciascuna cellula si divide in due cellule figlie che, dal punto di vista genetico e della forma, sono identiche tra loro e con la cellula madre. Il secondo processo, detto meiosi, interessa le cellule sessuali; da una cellula si formano quattro cellule figlie che presentano la metà del patrimonio genetico della cellula originaria. Questi processi sono caratteristici delle cellule dette eucarioti. Se si guarda alla loro organizzazione interna, le cellule possono infatti essere distinte in due grandi categorie: le cellule *procarioti* e le cellule *eucarioti*.

Le cellule procarioti caratterizzano i batteri e le alghe azzurre; sono piccole e mostrano una struttura interna semplice. Gli acidi nucleici sono concentrati in una regione del *citoplasma*, una complessa soluzione acquosa. Non sono quasi presenti strutture membranose, i cosiddetti organuli, oltre i *ribosomi*, preposti alla sintesi delle proteine. Le funzioni cellulari sono svolte da complessi enzimi.

Le cellule eucarioti, caratteristiche delle piante, dei funghi e degli animali, sono notevolmente più grandi delle precedenti e presentano diversi organuli. L'organulo di maggiori dimensioni nelle cellule vegetali e animali è il *nucleo*, importante perché contiene l'acido nucleico, cioè il materiale genetico, gli istoni, proteine presenti in coppie e in numero variabile a seconda del tipo di cellula, e proteine non istoniche. Vi sono poi due organuli particolarmente importanti: i *mitocondri*, che rappresentano la sede del processo di respirazione cellulare attraverso la quale la cellula ricava energia bruciando, in presenza di ossigeno, molecole di glucosio che derivano dalla demolizione delle sostanze nutritive; e *ribosomi* che, come detto, sono preposti alla sin-

tesi delle proteine. Il contenuto della cellula è interamente racchiuso da una membrana di natura semipermeabile, che così forma una specie di barriera tra l'ambiente interno ed esterno alla cellula stessa. Questa membrana è costruita con un doppio strato di molecole di particolari grassi in cui sono immerse numerose proteine. In quanto barriera, la membrana consente la regolazione della composizione chimica della cellula. Data la sua consistenza, le molecole idrosolubili non sono in grado, spontaneamente, di attraversare la membrana; perché ciò sia possibile è necessaria una proteina specifica dotata di una cavità centrale, incuneata nella membrana. Attraverso questo sistema di trasporto, la cellula può mantenere valori interni di concentrazione diversi da quelli dell'ambiente esterno. Infine, la membrana è anche il mezzo attraverso il quale la cellula si fa riconoscere dalle altre cellule, giacché contiene particolari molecole in grado di verificare se tale cellula fa parte dell'organismo stesso o le è estranea, nel qual caso deve essere attaccata e distrutta dal sistema immunitario.

Nelle cellule animali, la membrana non presenta in genere strati esterni di rivestimento; nei batteri e nei vegetali, invece, all'esterno della membrana si trova una parte rigida. Nei batteri, questa struttura ha una funzione protettiva, nei vegetali a quest'ultima si aggiunge anche quella di sostegno e di conservazione della forma tipica. La parete limita i movimenti della cellula così come l'ingresso o la fuoriuscita di materiali.

Gli organuli tipici delle cellule vegetali sono tre:

- la parete, cioè uno strato rigido posto all'esterno della membrana cellulare, è costituita in gran parte da cellulosa;
- i plastidi, organuli di particolare importanza, tra cui i principali sono i cloroplasti, che costituiscono la sede della sintesi clorofilliana e contengono le molecole di clorofilla necessarie al processo;
- il vacuolo, ovvero una cavità delimitata da una membrana, piena di liquido, che svolge varie funzioni metaboliche.

L'efficienza e l'armonia delle diverse funzioni dell'organismo è dovuta ai sistemi di comunicazione esistenti tra le cellule e tra queste e l'ambiente esterno.

Dal punto di vista della loro tipologia, le cellule si dividono in:

- *germinali*;
- *somatiche*.

Le cellule germinali, riproduttive, sono lo spermatozoo e l'ovulo. Le cellule somatiche si distinguono a loro volta in:

- *differenziate*;
- *staminali*.

Le cellule differenziate costituiscono la maggior parte delle cellule del nostro corpo; tutti i nostri organi, dalla pelle al cervello, sono formati da questa varietà di cellule somatiche differenziate. Tra queste possiamo ulteriormente distinguere:

- cellule soggette al rinnovamento, ovvero cellule che nel corso della vita dell'individuo vengono sostituite a ritmo continuo da nuove cellule, come accade per quelle della cute;
- cellule che non si dividono più allorché l'individuo ha raggiunto la crescita ma che, in determinate circostanze, ad esempio traumi o ferite, possono riprendere la divisione, come avviene per il fegato, la tiroide e il tessuto muscolare liscio;
- cellule, come quelle nervose, che cessano la divisione ancor prima che lo sviluppo dell'organismo sia completato.

Le cellule staminali non sono pienamente differenziate e possono originare altre cellule differenziate dell'organismo. Si distinguono in due tipi:

- staminali embrionali;
- staminali in organismo già formato.

Le cellule staminali embrionali costituiscono l'embrione, cioè il nuovo individuo che si forma in seguito al concepimento, nelle sue primissime fasi. Queste cellule sono dette *totipotenti*, ossia capaci di dar luogo all'intero organismo, con tutte le cellule che lo compongono.

Le cellule staminali in organismo già formato sono presenti soprattutto nel cordone ombelicale e nella placenta, al momento della nascita dell'individuo, o nell'adulto, in particolare nella parte centrale del midollo osseo. Anche queste cellule sono pronte a differenziarsi a seconda dei bisogni dell'organismo. In base alla loro differenziazione, queste cellule staminali sono dette *multipotenti* o *pluripotenti*. Sono multipotenti se capaci di originare solo i diversi tipi di cel-

lule del tronco a cui appartengono; sono pluripotenti se possono dare origine a qualsiasi tipo di cellula dell'organismo, anche se non possono dar luogo a tutto un individuo. Recenti studi hanno dimostrato che alcune cellule staminali provenienti da adulti, trovandosi a contatto con tessuti cellulari diversi dal proprio tronco o gruppo, sviluppano cellule differenziate del tessuto con il quale sono entrate in contatto.

2. I cromosomi

Ogni specie biologica possiede generalmente, fatta eccezione per le piante poliploidi, un numero fisso di cromosomi, cioè strutture che codificano le informazioni che dirigono la crescita delle cellule, la loro differenziazione e strutturazione. I cromosomi possono essere individuati all'interno della cellula solo allorché si è in presenza di un processo di divisione cellulare (mitosi e meiosi); nel corso della normale attività metabolica sono indistinguibili perché agglomerate con l'acido nucleico e le proteine in un ammasso distinguibile (cromatina) nel nucleo degli organismi eucarioti.

I cromosomi sono presenti tanto negli organismi procarioti quanto in quelli eucarioti; nei primi, si riscontra un solo cromosoma circolare; nei secondi, il numero dipende dalla specie ed è detto corredo cromosomico. Ciascun elemento comprende solo una parte del codice genetico dell'individuo e, di conseguenza, ogni elemento è caratterizzato da una determinata sequenza di Dna.

In linea generale, possiamo distinguere i cromosomi in

- cromosomi sessuali
- cromosomi autosomi

A seconda della specie e del sesso, i cromosomi sessuali presenti possono essere ridotti a una singola unità, a due unità o a più di due unità; i batteri e gli organismi simili a essi hanno un solo cromosoma relativamente grande e altri piccoli elementi genetici chiamati *plasmidi*; nell'uomo, il maschio presenta una coppia XY, la femmina una coppia XX. Il corredo cromosomico della specie umana sarà così:

- 22 coppie + XY, per l'individuo maschio;
- 22 coppie + XX, per l'individuo femmina.

lule del tronco a cui appartengono; sono pluripotenti se possono dare origine a qualsiasi tipo di cellula dell'organismo, anche se non possono dar luogo a tutto un individuo. Recenti studi hanno dimostrato che alcune cellule staminali provenienti da adulti, trovandosi a contatto con tessuti cellulari diversi dal proprio tronco o gruppo, sviluppano cellule differenziate del tessuto con il quale sono entrate in contatto.

2. I cromosomi

Ogni specie biologica possiede generalmente, fatta eccezione per le piante poliploidi, un numero fisso di cromosomi, cioè strutture che codificano le informazioni che dirigono la crescita delle cellule, la loro differenziazione e strutturazione. I cromosomi possono essere individuati all'interno della cellula solo allorché si è in presenza di un processo di divisione cellulare (mitosi e meiosi); nel corso della normale attività metabolica sono indistinguibili perché agglomerate con l'acido nucleico e le proteine in un ammasso distinguibile (cromatina) nel nucleo degli organismi eucarioti.

I cromosomi sono presenti tanto negli organismi procarioti quanto in quelli eucarioti; nei primi, si riscontra un solo cromosoma circolare; nei secondi, il numero dipende dalla specie ed è detto corredo cromosomico. Ciascun elemento comprende solo una parte del codice genetico dell'individuo e, di conseguenza, ogni elemento è caratterizzato da una determinata sequenza di Dna.

In linea generale, possiamo distinguere i cromosomi in

- cromosomi sessuali
- cromosomi autosomi

A seconda della specie e del sesso, i cromosomi sessuali presenti possono essere ridotti a una singola unità, a due unità o a più di due unità; i batteri e gli organismi simili a essi hanno un solo cromosoma relativamente grande e altri piccoli elementi genetici chiamati *plasmidi*; nell'uomo, il maschio presenta una coppia XY, la femmina una coppia XX. Il corredo cromosomico della specie umana sarà così:

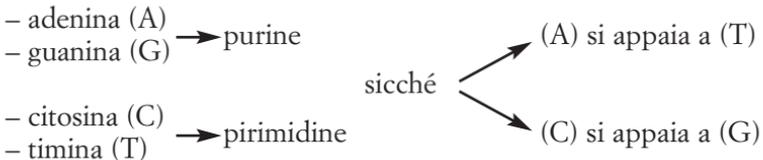
- 22 coppie + XY, per l'individuo maschio;
- 22 coppie + XX, per l'individuo femmina.

Nella formazione dei gameti dell'essere umano, cioè delle cellule germinali maschili e femminili, le cellule ovulo femminili presentano sempre un cromosoma X, mentre gli spermatozoi maschili possono presentare un cromosoma X o Y. La fecondazione di una cellula germinale femminile con una cellula germinale maschile che porta un cromosoma X origina uno zigote (la prima fase di sviluppo dell'embrione) con due X, cioè una femmina (XX). Al contrario, l'unione di una cellula germinale femminile con una maschile che porta un cromosoma Y origina uno zigote XY, cioè un individuo maschio (XY). Su questo schema fondamentale si realizzano numerose variazioni che caratterizzano le altre specie animali e vegetali. Il numero di cromosomi di una cellula o di un individuo può tuttavia variare, rispetto a quello standard, a causa di errori nel processo di meiosi o per l'effetto di agenti in grado di indurre mutazioni genetiche.

3. Il Dna

Ogni cromosoma è formato da un doppio filamento molto lungo di acido desossiribonucleico (Dna) che costituisce i geni dell'organismo per i quali avviene la sintesi delle proteine, molte delle quali sono enzimi. Il Dna è presente in tutti gli esseri viventi eucarioti e procarioti, in alcuni virus e nei prioni.

La struttura del Dna è stata spiegata e rappresentata attraverso un modello a doppia elica. In effetti, ogni molecola di acido desossiribonucleico può essere considerato come una scala a chiocciola i cui montanti o corrimano (i due filamenti) sono composti da una sequenza di molecole di un particolare zucchero, il desossiribosio, e da gruppi di fosfati, mentre i gradini corrispondono perfettamente a coppie di basi azotate, ossia molecole che dal punto di vista chimico appartengono al gruppo delle purine e pirimidine. La loro configurazione è la seguente.



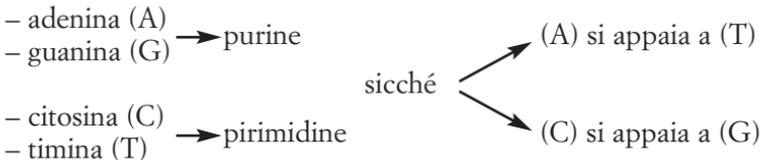
Dal momento che l'adenina (A) si lega sempre e solo con la timina (T), mentre la citosina (C) si lega sempre e solo con la guanina (G),

Nella formazione dei gameti dell'essere umano, cioè delle cellule germinali maschili e femminili, le cellule ovulo femminili presentano sempre un cromosoma X, mentre gli spermatozoi maschili possono presentare un cromosoma X o Y. La fecondazione di una cellula germinale femminile con una cellula germinale maschile che porta un cromosoma X origina uno zigote (la prima fase di sviluppo dell'embrione) con due X, cioè una femmina (XX). Al contrario, l'unione di una cellula germinale femminile con una maschile che porta un cromosoma Y origina uno zigote XY, cioè un individuo maschio (XY). Su questo schema fondamentale si realizzano numerose variazioni che caratterizzano le altre specie animali e vegetali. Il numero di cromosomi di una cellula o di un individuo può tuttavia variare, rispetto a quello standard, a causa di errori nel processo di meiosi o per l'effetto di agenti in grado di indurre mutazioni genetiche.

3. Il Dna

Ogni cromosoma è formato da un doppio filamento molto lungo di acido desossiribonucleico (Dna) che costituisce i geni dell'organismo per i quali avviene la sintesi delle proteine, molte delle quali sono enzimi. Il Dna è presente in tutti gli esseri viventi eucarioti e procarioti, in alcuni virus e nei prioni.

La struttura del Dna è stata spiegata e rappresentata attraverso un modello a doppia elica. In effetti, ogni molecola di acido desossiribonucleico può essere considerato come una scala a chiocciola i cui montanti o corrimano (i due filamenti) sono composti da una sequenza di molecole di un particolare zucchero, il desossiribosio, e da gruppi di fosfati, mentre i gradini corrispondono perfettamente a coppie di basi azotate, ossia molecole che dal punto di vista chimico appartengono al gruppo delle purine e pirimidine. La loro configurazione è la seguente.



Dal momento che l'adenina (A) si lega sempre e solo con la timina (T), mentre la citosina (C) si lega sempre e solo con la guanina (G),

ogni base si presenta sempre appaiata alla sua complementare. Tutte le basi rappresentano, in via analogica con le lettere che compongono l'alfabeto di una lingua, delle lettere chimiche.

La quantità di Dna per cellula, come pure la lunghezza dei suoi filamenti, varia decisamente a seconda degli organismi: se il Dna di un batterio contiene circa due milioni di basi, il nostro ne contiene circa tre miliardi e mezzo.

In una molecola di Dna, l'insieme:

- base azotata
- molecola di desossiribosio → prende il nome di *nucleotide*
- molecola di fosfato

La sequenza di tre nucleotidi si dice *tripletta* o *codone*, e corrispondono ai diversi amminoacidi; questa particolare proprietà permette la sintesi proteica.

Per avere un'idea delle dimensioni con cui abbiamo a che fare, merita riprendere l'analogia poco sopra delineata a proposito delle lettere chimiche. Se, nel caso dell'essere umano, volessimo trascrivere tutte queste lettere, avremmo bisogno di circa duecento volumi, ciascuno dei quali costituito di mille pagine. Le quattro basi appaiate possono infatti essere considerate come un alfabeto di quattro lettere chimiche che, combinandosi a gruppi di tre paia, formano le triplette, ossia le parole. Naturalmente, le parole possono essere più o meno lunghe in virtù delle combinazioni delle lettere chimiche. Gruppi di triplette collegati tra loro in una sequenza stabilita formano i geni, cioè le frasi. La successione programmata dei geni lungo tutto il Dna forma il *genoma*, il vero e proprio libro dove è scritto tutto il nostro patrimonio genetico.

Il Dna svolge due funzioni fondamentali, coadiuvato dalle proteine:

- la *replicazione*, attraverso la quale il Dna viene fedelmente copiato e trasmesso;
- la *trascrizione*, attraverso la quale si avvia il processo di sintesi delle proteine.

Il Dna è in grado di replicarsi, ossia formare copie della sua stessa molecola, consentendo così i processi di divisione cellulare. Il meccanismo con cui il Dna produce se stesso avviene prima di ogni divisione cellulare sicché le cellule figlie ricevono ciascuna una copia

del patrimonio genetico. Perché ciò accada, ossia per poter duplicare una copia del Dna, i due filamenti della doppia elica modificano la loro geometria e si separano, come se il corrimano di una scala a chiocciola perdesse il suo andamento elicoidale per proporsi semplicemente come quello di una scala dritta. Ciascun filamento del Dna diviene allora una specie di stampo per assemblare nuovi filamenti complementari. Grazie a un enzima particolare, denominato Dna *polimerasi*, a ogni base di ciascun filamento originario, cioè a ogni gradino della scala, si appaiano basi azotate complementari: a ogni (A) si appaia una (T) e a ogni (G) si appaia una (C). È così che vengono a formarsi due nuove coppie di eliche, ciascuna costituita da un vecchio filamento e da uno nuovo.

Come sappiamo, il Dna è sempre strettamente unito a una serie di proteine; occorre inoltre registrare anche la presenza di una molecola molto simile allo stesso Dna, quella dell'acido ribonucleico (Rna), anch'essa presente negli organismi eucarioti e procarioti e in diversi virus. Infatti, la struttura dell'acido ribonucleico presenta una sequenza di molecole di zucchero ribosio e gruppi di fosfati. A ogni molecola di zucchero è legata una base azotata che appartiene, come è facilmente intuibile, alle purine o alle pirimidine. Avremo così:

– adenina (A)	→	purine		– citosina (C)	→	pirimidine
– guanina (G)				– uracile (U)		

L'unità costituita da:

– base azotata		
– molecola ribosio	→	prende il nome di <i>nucleotide</i>
– molecola di fosfato		

In estrema sintesi, potremo dunque affermare che l'acido ribonucleico o Rna si differenzia dall'acido desossiribonucleico per il fatto che sostituisce la timina (T) con un'altra base azotata simile, cioè l'uracile (U), e, al posto del desossiribosio, presenta un altro zucchero, il ribosio. Quanto detto ci consente di illustrare la seconda funzione fondamentale del Dna, cioè la trascrizione, fase nella quale viene copiato un solo filamento di Dna che dà origine a una singola elica di Rna.

Nel processo di trascrizione, la molecola di Dna con il suo doppio filamento avvolto su se stesso si apre sotto l'azione di determinati enzi-

mi; lo sviluppo è presieduto in particolare da un enzima denominato Rna polimerasi e consiste nell'appaiare le basi (A), (T), (G), (C) con le basi (U), (A), (C), (G), rispettivamente. Il risultato è la produzione di Rna denominato *messaggero* (*mRna*) in quanto identificato come molecola di Rna che porta il messaggio "scritto" sul Dna, e di conseguenza trasferibile dal nucleo, all'apparato cellulare, che poi lo *traduce* in proteine. Detto in altri termini, quanto è scritto sul Dna con l'alfabeto formato dalle lettere (A), (T), (G), (C) viene trascritto con un altro alfabeto costituito dalle lettere (A), (U), (G), (C) e poi tradotto in un'altra lingua, cioè la produzione di proteine, attraverso un terzo alfabeto costituito da venti lettere, ovvero gli amminoacidi. La traduzione avviene nelle cellule mediante un complesso sistema costituito da proteine e Rna in modo tale da far corrispondere, in virtù di un dato codice, un amminoacido a una tripletta di basi azotate. Negli organismi procarioti, dove il cromosoma è libero nel citoplasma, la traduzione può iniziare anche prima che la trascrizione sia completata; negli organismi eucarioti i cromosomi sono isolati nel nucleo e i ribosomi si trovano nel citoplasma, sicché la traduzione di *mRna* nella proteina corrispondente inizia solo allorché il messaggero, prodotto nel nucleo, viene trasferito nel citoplasma.

4. I geni

Il genoma, cioè il corredo ereditario di un organismo, è suddiviso in una molteplicità di frazioni: ogni frazione forma un gene. Considerato singolarmente, e in termini molto approssimativi, il gene è l'unità ereditaria di ogni organismo vivente (procariote o eucariote) e dei virus che controlla la presenza nell'individuo di un determinato carattere e ne permette la trasmissione ai discendenti.

Il genoma umano conta circa 35.000 geni, indubbiamente un numero considerevole. Eppure, tutti questi geni costituiscono solo l'1% del nostro Dna totale. Ora, poiché i geni sono formati dal Dna, in ogni cellula si trovano tutti i geni, cioè l'intero genoma; allo stesso modo, ciascun individuo presenta esattamente gli stessi geni del suo simile, benché ognuno di noi presenti diverse varianti. Queste ultime prendono il nome di *alleli*.

Ci si può legittimamente chiedere come possa accadere che nel patrimonio genetico di una stessa specie vi sia la compresenza di diverse forme degli stessi geni. Ciò è facilmente spiegabile se si considera che il Dna non è statico, immobile; al contrario, esso muta, cambia continuamente:

mi; lo sviluppo è presieduto in particolare da un enzima denominato Rna polimerasi e consiste nell'appaiare le basi (A), (T), (G), (C) con le basi (U), (A), (C), (G), rispettivamente. Il risultato è la produzione di Rna denominato *messaggero* (*mRna*) in quanto identificato come molecola di Rna che porta il messaggio "scritto" sul Dna, e di conseguenza trasferibile dal nucleo, all'apparato cellulare, che poi lo *traduce* in proteine. Detto in altri termini, quanto è scritto sul Dna con l'alfabeto formato dalle lettere (A), (T), (G), (C) viene trascritto con un altro alfabeto costituito dalle lettere (A), (U), (G), (C) e poi tradotto in un'altra lingua, cioè la produzione di proteine, attraverso un terzo alfabeto costituito da venti lettere, ovvero gli amminoacidi. La traduzione avviene nelle cellule mediante un complesso sistema costituito da proteine e Rna in modo tale da far corrispondere, in virtù di un dato codice, un amminoacido a una tripletta di basi azotate. Negli organismi procarioti, dove il cromosoma è libero nel citoplasma, la traduzione può iniziare anche prima che la trascrizione sia completata; negli organismi eucarioti i cromosomi sono isolati nel nucleo e i ribosomi si trovano nel citoplasma, sicché la traduzione di *mRna* nella proteina corrispondente inizia solo allorché il messaggero, prodotto nel nucleo, viene trasferito nel citoplasma.

4. I geni

Il genoma, cioè il corredo ereditario di un organismo, è suddiviso in una molteplicità di frazioni: ogni frazione forma un gene. Considerato singolarmente, e in termini molto approssimativi, il gene è l'unità ereditaria di ogni organismo vivente (procariote o eucariote) e dei virus che controlla la presenza nell'individuo di un determinato carattere e ne permette la trasmissione ai discendenti.

Il genoma umano conta circa 35.000 geni, indubbiamente un numero considerevole. Eppure, tutti questi geni costituiscono solo l'1% del nostro Dna totale. Ora, poiché i geni sono formati dal Dna, in ogni cellula si trovano tutti i geni, cioè l'intero genoma; allo stesso modo, ciascun individuo presenta esattamente gli stessi geni del suo simile, benché ognuno di noi presenti diverse varianti. Queste ultime prendono il nome di *alleli*.

Ci si può legittimamente chiedere come possa accadere che nel patrimonio genetico di una stessa specie vi sia la compresenza di diverse forme degli stessi geni. Ciò è facilmente spiegabile se si considera che il Dna non è statico, immobile; al contrario, esso muta, cambia continuamente:

le quattro basi azotate si sostituiscono l'un l'altra, possono esser tolte o aggiunte, intere sezioni di Dna sono persino capaci di spostarsi autonomamente da una parte all'altra del cromosoma.

La struttura del gene è soggetta a modifica sia per effetto di fenomeni spontanei sia mediante processi artificiali; la modificazione del gene prende il nome di *mutazione* che, dunque, può essere spontanea o indotta.

Ogni essere umano ha due copie di ogni gene; se le copie sono uguali l'individuo in questione è denominato omozigote, in caso contrario, quando cioè le copie di ogni gene sono diverse, l'individuo in questione è detto eterozigote. Non è difficile constatare che, frequentemente, nell'individuo eterozigote uno degli alleli prevale sull'altro: il caso dell'allele per gli occhi neri che domina su quello per gli occhi azzurri è un esempio classico. Spesso ciò accade perché l'allele prevalente ha semplicemente maggiore opportunità di esprimersi, ed è definito *dominante*, mentre l'altro viene indicato come *recessivo*. Tutti i geni del nostro corredo consteranno quindi di una parte eterozigote e una omozigote; dei geni che appartengono alla parte eterozigote sarà in evidenza solo l'allele dominante.

L'insieme dei geni, ovvero quelli dominanti e quelli recessivi, è definito *genotipo*; l'insieme dei caratteri presenti in un individuo è invece detto *fenotipo*.

La corrispondenza tra gene, Rna e proteine si manifesta con una tale perfezione da poter indurre a pensare che, una volta conosciuta la sequenza delle basi del Dna di un organismo, saremo in grado di prevedere in modo certo e sicuro le proteine sintetizzate. Poiché queste ultime sono il vero e proprio materiale su cui si costruisce la vita, ciò significa che dovremmo essere in grado di prevedere, con altrettanta certezza e sicurezza, la forma, le funzioni, insomma la vita di un organismo. La realtà delle cose non è però così lineare, è anzi molto più complicata di quello che sembra. In altri termini, la lettura del Dna presenta considerevoli margini di ambiguità. In primo luogo, la trascrizione di una stessa sequenza di Dna presenta diversi punti iniziali e finali, sicché si crea la possibilità di produrre diversi Rna *messaggero* (*mRna*) e, di conseguenza, proteine diverse; in secondo luogo, i geni non vengono mai trascritti e tradotti tutti insieme in una cellula: si stima che solo 2000, dei circa 35.000 geni che ci appartengono, siano effettivamente presenti e operanti in ogni cellula, e che difficilmente questi geni sono gli stessi in cellule diverse e in tempi diversi.

La composizione e la struttura complessiva delle cellule e degli organismi, che varia anche in organismi che presentano gli stessi geni a seconda delle condizioni in cui vivono, deriva da una rete estremamente intricata di fenomeni. Ciò vuol dire che il fenotipo di un individuo non è unico e stabilito una volta per tutte al momento della nascita dai geni di cui è dotato, ma è il risultato di una serie di fenotipi che variano col tempo, compatibilmente con i processi che possono verificarsi all'interno del genotipo. È infine opportuno sottolineare che alcuni geni hanno un ruolo e un'importanza più rilevante di altri: sono quelli che intervengono inizialmente, e la cui attività è dunque in grado di alterare o render nulla la serie di eventi necessari alla formazione dell'individuo, quali ad esempio i geni materni, o quei geni che possono condizionare nello stesso tempo la trascrizione di molti pezzi di Dna, come ad esempio i geni di animali e piante che conducono alla sintesi degli ormoni. La modificazione di questi geni ha, come è facile capire, effetti molto significativi sul piano dell'imprevedibilità.

ALLARME OGM?

1. Il miglioramento genetico

Sono trascorsi almeno diecimila anni dal momento in cui i nostri progenitori si accorsero che era possibile selezionare specie selvatiche di piante, animali, e persino microrganismi. Ciò è avvenuto in concomitanza con la domesticazione. Il primo animale addomesticato fu quasi sicuramente il cane, seguito dai mammiferi da allevamento come pecore, buoi, capre e maiali. Non più sottoposti ai rigidi meccanismi della selezione naturale, non solo l'alimentazione, ma anche la riproduzione, per queste specie di animali non fu più un fatto casuale ma regolato, determinato da criteri imposti dall'uomo per i suoi fini. Ha inizio, insomma, la pratica della selezione artificiale con lo scopo di ottenere un miglioramento delle caratteristiche genetiche di piante coltivate e animali allevati utilizzando la variabilità genetica già esistente e disponibile per incrementare il numero di individui con caratteristiche considerate utili e ridurre il numero di organismi considerati non interessanti dal punto di vista dei bisogni dell'uomo. In questo modo si sono selezionate razze e varietà omogenee ma diverse tra loro, perché ciascuna adatta a una determinata funzione. Al contempo, e probabilmente non intenzionalmente, i processi di fermentazione davano inizio anche alla selezione dei microrganismi.

I metodi di selezione del mondo antico si basavano su una serie di incroci, cioè l'accoppiamento di due animali e di due vegetali di specie diverse, condotti in modo *casuale* fino al conseguimento più o meno soddisfacente di un individuo con determinate, volute caratteristiche.

Le numerose varietà, peraltro attualmente presenti, ottenute con incroci *non casuali* sono state prodotte solo dopo il XVI secolo. Di ciascuna generazione di animali o piante venivano selezionati gli individui che presentavano le caratteristiche richieste; successivamente questi individui venivano poi incrociati tra loro. Tale meto-

do, che ha sicuramente ottenuto notevoli risultati, presentava tuttavia non pochi problemi:

- il processo era molto lento, insicuro e, cosa non trascurabile, dava luogo al miglioramento di individui isolati ma non a quello dei caratteri della specie;
- operando con incroci all'interno di piccole mandrie, di greggi o di coltivazioni, nell'arco di una generazione non era infrequente perdere quanto guadagnato in precedenza;
- al miglioramento di un carattere spesso si accompagnava il peggioramento di altri (se ad esempio si incrementava la produzione di latte nelle mucche, si perdeva sul piano della loro fertilità);
- negli incroci tra organismi vegetali appartenenti a specie o generi affini gli *ibridi* ottenuti, riproducendosi, non davano luogo nelle successive generazioni ai caratteri desiderati, ma regredivano all'aspetto di uno dei due genitori;
- il reincrocio, ovvero l'incrocio di un ibrido e un individuo parentale, utilizzato per determinare i caratteri voluti nella discendenza, spesso produceva organismi poco fertili e deboli.

Dalla metà del XVIII secolo fino ai primi anni del Novecento si iniziò a combinare i diversi metodi di selezione con l'*inincrocio* e con l'*esogamia*. L'inincrocio comprende tanto l'incrocio tra fratelli e fratellastri quanto il reincrocio tra figli e genitori al fine di fissare un particolare carattere. L'esogamia è invece l'accoppiamento degli individui delle razze ottenute mediante l'inincrocio con individui esterni al gruppo, anche di razze diverse; ciò permette di incrementare il vigore ed evitare che i caratteri indesiderati si accumulino, oltre a presentare il vantaggio di aumentare la variabilità e la possibilità di nuove combinazioni di caratteri. Tuttavia, solo dopo la rivisitazione del contributo fondamentale apportato dalle leggi di Gregor Johann Mendel (1822-1884), un monaco moravo, si è giunti a una vera e propria pianificazione degli incroci. Mendel aveva trattato i caratteri semplici e qualitativi di alcune piante e dimostrato che i caratteri ereditari sono trasmessi da unità, in seguito denominate geni. I caratteri ereditari, secondo Mendel non solo non si mescolano nelle generazioni successive, ma neppure vengono estromessi da altri caratteri. Così, l'attenta analisi di incroci ci consentirebbe di prevedere quali tipi di discendenza compariranno, e in quale proporzione, nella generazione successiva. Lo studio delle ri-

cerche di Mendel ha condotto ad accertare che anche la trasmissione dei caratteri quantitativi rientra nelle conclusioni a suo tempo tratte dal monaco moravo. L'introduzione dei metodi statistici ha infine reso la selezione ancor più precisa.

Attualmente, sul piano della riproduzione controllata negli animali, le tecniche si basano ancora sulla selezione fondata unicamente sulle qualità individuali, integrata da altri tre criteri:

- la selezione del pedigree, che guarda più alle qualità degli antenati che a quelle dell'individuo;
- la selezione familiare, basata sulle qualità dei parenti collaterali, quali fratelli o fratellastri;
- la selezione della discendenza, per cui si scelgono gli individui in base alle caratteristiche dei loro discendenti.

Nei riguardi della riproduzione controllata dei vegetali, anche in questo caso si utilizzano le varie forme di selezione accompagnate da tecniche di inincrocio ed esogamia, talvolta integrate da procedure quali la selezione di una linea pura e l'ibridazione. La selezione di una linea pura richiede inincroci e selezioni continui per uno o più caratteri fino alla fissazione del carattere stesso e al conseguimento di una popolazione più o meno omogenea, cioè omozigote; l'ibridazione consiste invece nell'incrocio di varietà o specie distinte per produrre appunto ibridi con una combinazione di caratteri superiore a quelli dei genitori. L'ibridazione vegetale, che si ottiene molto più facilmente e con risultati superiori rispetto a quella animale, è stata per molto tempo un passaggio fondamentale. L'unico difetto, a fronte in verità di molti pregi propri dell'ibridazione, sta nella debole fertilità che, quando è presente, non sempre consente la trasmissione dei caratteri voluti alla generazione successiva; ogni stagione si devono così selezionare nuovi ibridi.

Bisogna infine precisare che, nell'ambito dei vegetali, vi sono differenze importanti relative alle caratteristiche della riproduzione. In effetti, oltre alla normale impollinazione molte piante, diversamente dagli animali, sono in grado di autofecondarsi o autoimpollinarsi, ossia di fecondare la cellula uovo con il polline che l'individuo stesso produce. L'impollinazione incrociata produce comunque maggiore variabilità genetica rispetto all'autofecondazione, che caratterizza piante quali il grano, l'orzo, i fagioli, i piselli, i pomodori ecc.

Risalgono agli anni Sessanta del secolo appena trascorso le tecniche elaborate in vista di ottenere artificialmente la variabilità genetica, tecniche che vanno sotto il nome di *mutagenesi*. I geni mutano, cambiano spontaneamente, e questa mutazione può essere condizionata, nel senso che la sua frequenza può essere aumentata se gli organismi in oggetto (sempre e comunque vegetali perché gli animali non resistono all'intervento) sono sottoposti a radiazioni o a determinate sostanze chimiche. Le mutazioni geniche sono semplicemente il cambiamento di una o più basi azotate nel Dna che in generale, anche se non sempre, comportano una parallela modificazione nella catena di amminoacidi (nella proteina) corrispondenti. La funzione del gene viene così leggermente modificata, quel tanto che basta per cambiare il fenotipo dell'individuo. Tuttavia, come appare evidente, anche in questo caso non si introducono nuove funzioni, ma si interviene agendo su quelle già fissate dall'evoluzione naturale.

Nel caso dell'utilizzazione e del controllo dei microrganismi, vi sono almeno quattro ambiti esemplificativi:

- la pratica della vinificazione, dove i lieviti utilizzati sono usati per la trasformazione degli zuccheri in alcol etilico e la modificazione del mosto in vino. Si tratta di procedure che richiedono complesse reazioni chimiche che portano alla produzione delle molecole responsabili del gusto e dei profumi dei vini;
- la produzione dei derivati del latte, dove la tipicità del prodotto dipende in gran parte, come nel caso precedente, dagli enzimi responsabili della fermentazione;
- l'uso di microrganismi nella coltivazione delle leguminose. In questo particolare caso, si utilizzano specifici batteri che si insinuano nelle radici delle piante e fissano l'azoto atmosferico che i vegetali assumono come nutrimento (relazione di simbiosi). Peraltro, parte di questo azoto resta nel terreno e dunque può essere utilmente assorbito anche dalle generazioni successive. È opportuno osservare che in questo ambito sono utilizzati anche mutanti degli stessi microrganismi. I batteri, infatti, se contengono un solo cromosoma principale, dispongono però, come già è stato evidenziato, di una serie di elementi genetici autonomi detti plasmidi, che si scambiano con facilità anche con specie assai lontane. Non solo: molti batteri sono in grado di integrare nel loro patrimonio genetico frammenti di Dna che rintracciano nell'ambiente circostante attraverso una vera e propria trasformazione;

- la produzione di sostanze farmaceutiche, cioè molecole che, utilizzate singolarmente o insieme ad altre, permettono una certa efficacia nella cura di alcune specifiche affezioni. Le tecniche seguite sono quelle note, dall'incrocio alla selezione, alla mutagenesi, alla trasformazione, sfruttando la relativa semplicità dei genomi batterici.

2. Ingegneria genetica

Si tratta dell'insieme delle tecniche messe in atto per modificare in modo *predeterminato* le caratteristiche ereditarie di un organismo, alterandone il materiale genetico. Si faccia bene attenzione alla definizione appena espressa, soprattutto allorché si precisa che le operazioni eseguite modificano in modo *predeterminato* certe caratteristiche. In questo caso, adottare delle tecniche o delle strategie significa aver in precedenza elaborato un piano ben preciso: un progetto! Non è dunque casuale, bensì altamente pertinente, l'uso che, in questa circostanza, si fa del termine "ingegneria", perché proprio l'ingegnere determina prima dei piani, dei progetti, che lui stesso controlla nelle diverse fasi della loro attuazione, che si tratti della costruzione di un edificio, di una strada, di un meccanismo. In questo senso, benché ciò possa apparire poco elegante, l'ingegneria genetica considera gli esseri viventi alla stessa stregua di meccanismi che risultano così costituiti secondo uno specifico progetto, custodito nel Dna, i cui pezzi, cioè i geni, sono considerati non solo indipendenti tra loro, ma persino sostituibili una volta che ne è stata stabilita e conosciuta la funzione.

Le procedure e le tecniche messe in atto dall'ingegneria genetica consistono appunto nella possibilità di isolare un gene (che come sappiamo ha l'informazione necessaria per la produzione delle proteine), per poi inserirlo nel corredo ereditario di un altro organismo, diverso da quello nel quale è stato isolato il nostro gene. Per questo motivo, l'ingegneria genetica è anche denominata tecnologia del Dna ricombinante: proprio perché implica la manipolazione del Dna.

Per poter operare la manipolazione sono necessari alcuni strumenti fondamentali: gli *enzimi di restrizione*. Si tratta di enzimi che vengono prodotti da diverse specie di batteri. Il loro compito consiste nel riconoscere una sequenza specifica all'interno di una molecola di Dna. Una volta riconosciuta, su questa sequenza viene operato un

vero e proprio taglio. In questo modo si generano frammenti di Dna originari di specie diverse che custodiscono al loro interno geni o sequenze ritenute interessanti o utili, frammenti che possono essere uniti ad altre molecole di Dna mediante particolari enzimi chiamati *ligasi*.

Come è facile capire, abbiamo costruito una combinazione di Dna che prima non esisteva e che non si sarebbe mai potuta creare spontaneamente. Il nuovo Dna, ottenuto combinando insieme frammenti che provengono da specie diverse, si è soliti chiamarlo Dna ricombinante (rDna).

Per inserire geni alieni nei batteri sono disponibili più tipi di vettori, tra i quali ve ne sono di idonei anche per la trasformazione di vegetali e organismi animali. Nel caso dei batteri, i vettori possono ben essere dei virus, e in tal caso il gene inserito viene integrato stabilmente nell'unico cromosoma del batterio oppure particolari molecole capaci di riprodursi autonomamente nell'ospite, dette *plasmidi*. Per far entrare nell'ospite il vettore, che già dispone del nuovo gene, è sufficiente trattare i batteri con una soluzione che contiene il Dna ricombinante.

L'inserimento di geni nei vegetali e negli animali richiede procedure più complesse.

Nel caso dei vegetali, come sappiamo, le cellule sono circondate da una parete molto resistente che impedisce al Dna un passaggio spontaneo. Per aggirare la difficoltà sono state elaborate diverse tecniche, tra le quali le seguenti:

- privare la cellula vegetale della parete mediante l'azione di particolari enzimi; le cellule senza le pareti vengono poi immerse in una "soluzione" di Dna che, a questo punto, ha facilità di accesso. Il limite di questa procedura sta nel fatto che, una volta inserito il Dna, è assai difficile ricostruire le pareti;
- bombardare le cellule con proiettili microscopici ricoperti di Dna provvisto del gene da inserire (tecnica biobalistica). Il bombardamento non è casuale: privilegia le cellule presenti nelle parti della pianta dove la fase di divisione cellulare è maggiormente prolungata, ovvero le parti che originano i fiori. Si aumentano così le probabilità che ovuli e polline siano trasformati dando il via a una generazione di semi e di piante geneticamente modificate;
- sfruttare l'azione di due batteri patogeni: l'*Agrobacterium tumefaciens* e l'*Agrobacterium rhizogenes*. Quando questi due batteri

infettano un vegetale, inseriscono spontaneamente nella pianta alcuni dei loro geni. Una parte dei geni inseriti consente alle cellule della pianta di sintetizzare determinati ormoni che inducono la divisione cellulare col risultato che se il batterio utilizzato è l'*Agrobacterium tumefaciens*, avremo la formazione di galle, nel caso invece dell'*Agrobacterium rhizogenes*, otterremo le radici. Altri geni consentono la sintesi di molecole nutritive dell'agente patogeno inserito. A questo punto, per trasferire nella pianta uno o più geni che consideriamo utili, non faremo altro che togliere al plasmidio i geni responsabili della sintesi ormonale e inserire al loro posto quelli prescelti.

Negli animali, compresi gli esseri umani, il vettore è generalmente un virus cui è stata asportata la parte di geni che lo renderebbero pericoloso per l'ospite. Rigenerare un intero organismo con poche cellule già in parte differenziate è tuttavia impresa estremamente difficile; per questo motivo, normalmente si procede alla trasformazione di cellule embrionali appena sviluppate o a cellule staminali. In tal caso, il nucleo della cellula trattata viene trasferito in una cellula uovo normale, ma privata del nucleo. La cellula modificata sarà poi impiantata in utero dove si svilupperà fino alla nascita del nuovo organismo.

Nonostante il rapidissimo sviluppo di tecniche sempre più sofisticate, la manipolazione genetica sul versante vegetale e animale comporta una serie di problemi che si manifestano meno nel caso dei batteri, data la loro struttura più semplice. Anzitutto, non è possibile prevedere esattamente quante copie del gene esogeno o alieno si inseriranno nelle cellule trattate né in quale parte del genoma dell'ospite si collocheranno. Si tratta di due aspetti molto rilevanti dal momento che un maggior numero di copie del gene esogeno potrebbe implicare una maggiore attività del gene stesso con conseguente produzione di quantità non previste della proteina corrispondente; il frammento inserito potrebbe poi finire in un gene dell'ospite e renderlo inattivo, eventualità che potrebbe arrecare danni all'organismo trasformato. In secondo luogo, nel corso del processo di trasferimento, il gene introdotto può cambiare e risultare inattivo una volta integrato nell'ospite. Nel caso delle piante, infine, quando si opera con vegetali su un terreno nutritivo artificiale può accadere che, prima del loro sviluppo come organismi normali, subiscano modifiche spontanee del loro patrimonio gene-

tico perché il periodo di passaggio in vitro ne aumenta la frequenza. Queste mutazioni, in ogni caso non previste, si trasmetteranno alle successive generazioni.

3. Organismi geneticamente modificati

Da quando l'uomo ha intrapreso l'attività di allevatore e di coltivatore, non era mai stato in grado di operare interventi di miglioramento delle specie con un altissimo grado di precisione quale quello che le attuali tecniche dell'ingegneria genetica mettono a disposizione. Fino ad almeno due decenni or sono, le procedure messe in atto per migliorare microrganismi, piante e animali si esaurivano sostanzialmente nella mutagenesi e nell'incrocio tra individui sessualmente compatibili. Allo stato attuale possiamo con ragione parlare di organismi geneticamente modificati (*Ogm*), riferendoci esclusivamente ai *microrganismi* e alle *piante* il cui Dna è stato modificato con l'introduzione di un gene estraneo proveniente da un altro organismo vivente, dal quale è stato isolato e prelevato. Detto in altri termini, oggi siamo in grado, perché ne possediamo le conoscenze teoriche e le tecniche procedurali, di trasferire geni esogeni in microrganismi e in piante in modo tale da conseguire una stabile integrazione del gene proveniente dall'esterno sul loro Dna. Resta inteso che il gene isolato proviene da un accurato esame selettivo e dalla scelta tra i geni che più si avvicinano alle caratteristiche che vogliamo trovare una volta realizzato il processo di modificazione.

I risultati che la pratica della modificazione genetica dei microrganismi ci propone abbracciano, con maggiore e minore successo, tre campi: quello farmaceutico, quello industriale e quello agricolo.

Il campo *farmaceutico* è indubbiamente l'ambito che suscita immediatamente maggior interesse, per ovvi motivi. Anche noi esseri umani abbiamo infatti in dotazione dei geni che sono predisposti alla produzione di proteine di grande importanza per la nostra sopravvivenza. Come già abbiamo avuto modo di sottolineare, un certo numero di queste proteine regolano una serie di processi vitali, altre intervengono in passaggi fondamentali del nostro sistema metabolico; vi sono infine delle proteine che ci consentono di riconoscere i segnali provenienti dall'interno o dall'esterno e di trasmetterli ai geni incaricati di fornire una risposta. La carenza di

proteine, come ben si capisce, destabilizza il normale funzionamento dell'organismo, sicché è doveroso e vitale intervenire. L'ingegneria genetica ci consente di dare una risposta efficace a questa mancanza, perché ci offre la possibilità di isolare il gene cui fa capo la proteina insufficiente. Dopo questo passo, si tratterà di inserire il gene individuato in un batterio che, adeguatamente istruito, sarà indotto a produrre la proteina che c'interessa. Potremo così coltivare un microrganismo e da esso estrarre la proteina richiesta che, opportunamente purificata, potrà essere utilizzata per sopperire al nostro scompenso con un indiscutibile vantaggio rispetto a qualsiasi altro modo di procurarci la cura. Potremo in effetti disporre in quantità praticamente illimitata di proteine che, sul piano qualitativo, presentano un elevatissimo grado di purezza e, soprattutto, sono identiche a quelle umane così da rendere altamente improbabile l'insorgere di allergie. La produzione di insulina (un ormone proteico che fa capo al pancreas e principale responsabile del metabolismo dei carboidrati), essenziale per la cura del diabete mellito, è la risultante concreta delle prospettive che, su questo piano, può aprire l'ingegneria genetica. Fino a vent'anni fa, l'insulina veniva estratta dai suini, purificata e impiegata. Il prodotto, oltre a essere costoso, risultava e risulta qualitativamente inferiore all'insulina ottenuta dal Dna ricombinante, con l'aggravante di non poter escludere forme di allergia.

Nel campo *industriale*, è possibile realizzare la sintesi biologica di proteine capaci di eliminare molte sostanze inquinanti, residui di lavorazione ecc. anche se bisogna precisare che, grazie alla variabilità dei geni batterici e di altri microrganismi, spesso è sufficiente isolare i ceppi ritenuti idonei ai diversi usi. Molti batteri, in effetti, presentano plasmidi portatori di geni da cui traggono origine particolari enzimi in grado di distruggere sostanze inquinanti come i derivati del petrolio e altre sostanze tossiche. Il fatto poi che i batteri si scambino i plasmidi rende possibile far sì che singoli ceppi di batteri possano essere messi in condizione di intervenire ed eliminare più di una sostanza tossica. In questo contesto, le tecniche di ingegneria genetica possono intervenire per incrementare la quantità di enzimi considerati utili.

In campo *agricolo*, il Dna ricombinante può ottimizzare le interazioni tra certi batteri e le piante. Come già abbiamo avuto modo di osservare, determinate specie di leguminose, come il pisello, il fagiolo, la lenticchia, vivono in simbiosi con alcuni batteri che hanno

la caratteristica di fissare l'azoto e, con esso, costruire composti che servono da nutrimento alle piante; da parte loro, queste ultime forniscono energia ai batteri attraverso le scorie.

La modificazione dei vegetali è indiscutibilmente il settore che, anche sul piano dell'opinione pubblica, ha destato non poche perplessità e preoccupazioni nei riguardi dell'uso delle nuove metodologie elaborate dagli ingegneri genetici. Una pianta è geneticamente modificata allorché si è provveduto a inserire nel suo Dna un gene che è stato isolato da un altro organismo vivente; e poiché i vegetali hanno un'importanza non marginale per l'alimentazione umana e no, ben si comprende il vero e proprio allarme che la loro modifica ha suscitato circa l'impatto che eventuali coltivazioni potrebbero avere sull'ambiente e sulla salute dell'uomo. Tanto è vero che prima dell'introduzione delle procedure di miglioramento genetico mediante Dna ricombinante non si poneva e non si era mai posto il problema di richiedere valutazioni di sicurezza nei confronti delle piante coltivate. In vista della loro commercializzazione ci si limitava a selezionare e a registrare nuove varietà di vegetali solo sulla base di criteri agronomici, quali la resa, la resistenza ai parassiti e a stress abiotici; criteri organolettici, come il sapore e il profumo o semplicemente commerciali, ad esempio la deperibilità del prodotto, l'interesse da esso suscitato sul mercato. Raramente un particolare vegetale veniva sottoposto a esami tesi a darne una caratterizzazione dal punto di vista chimico. Per converso, nel caso in cui il miglioramento genetico delle piante coltivate preveda l'utilizzo di tecniche proprie dell'ingegneria genetica, sono richieste rigorose ed esaustive analisi chiamate a rispondere a severi obblighi legislativi ancor prima che ne venga rilasciata l'autorizzazione per l'impiego sia agricolo sia biomedico. Eppure, a priori, e come vedremo anche a posteriori, chi può affermare che lo stesso uso delle colture tradizionali è esente da rischi ambientali e per la salute? Le preoccupazioni per l'impatto delle piante geneticamente modificate sull'ambiente sono molteplici, e tutte considerate rilevanti.

a) La dispersione delle sementi

Come le piante tradizionali, anche quelle geneticamente modificate si riproducono attraverso la formazione di semi che, in un caso come nell'altro, possono essere dispersi nell'ambiente; tipico è l'esempio del mais. La dispersione nell'ambiente avviene in genere al mo-

mento della raccolta, del trasporto ai magazzini e nel corso della commercializzazione. Il fatto non è mai stato posto all'attenzione e alla preoccupazione generale anche perché il mais non è un vegetale invasivo: per poter crescere e prosperare necessita dell'intervento dell'uomo; in mancanza della sua cura e assistenza, è destinato a soccombere. Nel caso di un prodotto geneticamente modificato, ad esempio mais transgenico, nonostante le rassicurazioni che provengono da sperimentazioni accurate, il problema viene sollevato paventando turbamenti dell'equilibrio ambientale. In realtà, ciò potrebbe accadere solo nel caso in cui il gene o i geni inseriti fossero in grado di garantire alla pianta uno *status* altamente competitivo rispetto ai vegetali selvatici dell'ambiente circostante. Una simile eventualità può essere evidentemente scongiurata sia astenendosi dal modificare in tal senso il Dna della pianta in questione sia, nel caso dovesse presentarsi un simile e indesiderato effetto, inserendo un carattere di sterilità che impedisca lo sviluppo dei semi. La questione, è opportuno precisarlo, si è posta per la prima volta non in ambito transgenico ma tradizionale, precisamente con i pioppi ibridi che, diffondendo i loro semi, sviluppano piante invasive.

b) La fecondazione attraverso il polline di piante sessualmente compatibili

Il timore che il polline di piante transgeniche sia in grado di fecondare l'ovulo di vegetali sessualmente compatibili, dando così il via alla creazione di ibridi che potrebbero rivelarsi infestanti, è particolarmente avvertito. La preoccupazione non è infondata: tutt'altro, dal momento che il fenomeno si registra, e si è sempre registrato, nelle colture tradizionali. La diffusione del polline nell'ambiente porta alla fecondazione di altre piante producendo nuove combinazioni genomiche. Si tratta, in buona sostanza, di ibridi che risultano in effetti invasivi quando posseggono vantaggi selettivi; in caso contrario sono destinati a soccombere. Nel caso di piante geneticamente modificate, per motivi di chiarezza, è tuttavia necessario distinguere due diverse situazioni:

- quella in cui il gene estraneo è introdotto *nel Dna del nucleo*;
- quella in cui il gene esogeno è inserito *nel Dna del cloroplasto*.

La distinzione è fondamentale perché, come ben sappiamo, nel primo caso l'ereditarietà segue le leggi di Mendel, sicché i cromosomi di

ciascuna coppia di geni sono ripartiti nel polline e nell'ovulo; nel secondo caso, l'ereditarietà è per via materna, solo attraverso l'ovulo, sicché quest'ultimo risulterà geneticamente modificato mentre il polline non lo sarà, visto che è privo di cloroplasto, fatte salve le dovute eccezioni come nel caso delle conifere.

Attualmente, i vegetali transgenici rientrano tutti nel primo caso, con i geni esogeni inseriti nel nucleo. Ciò comporta una verifica scrupolosa dell'eventualità, tutt'altro che remota, che il polline geneticamente modificato sia capace di impollinare vegetali dell'ambiente circostante determinando la comparsa di piante geneticamente modificate. Dal momento che il fenomeno può di per sé presentarsi in natura, c'è da presumere che difficilmente il vegetale transgenico si comporterà diversamente, il che implica l'adozione di determinate strategie di valutazione caso per caso dopo aver verificato i modi e le circostanze attraverso le quali la pianta in esame si diffonde nell'ambiente. Si dovrà procedere caso per caso per due ordini di motivi: anzitutto, perché ogni pianta adotta diverse strategie per conseguire il fine della fecondazione; in secondo luogo, dal momento che è necessario valutare correttamente l'eventuale tasso di vantaggio selettivo conferito dal gene o dai geni alla pianta ibrida. Nell'eventualità che ciò si presenti, è possibile adottare due misure: invocare il divieto di commercializzazione della pianta transgenica o imporre che il gene o i geni siano integrati nel Dna del cloroplasto, se è possibile.

c) Il trasferimento diretto del gene esogeno nel Dna di vegetali non sessualmente compatibili

È assodato che, in natura, può aver luogo un trasferimento genico: i batteri che scambiano geni contenuti nei loro plasmidi lo dimostrano. La preoccupazione, su questo piano, è che il trasferimento spontaneo del gene estraneo nel Dna di vegetali presenti nelle vicinanze, benché non sessualmente compatibili, possa potenziare o dotare questi ultimi di capacità selettive rilevanti rendendoli infestanti. Allo stato attuale delle ricerche, non è disponibile una dimostrazione del fatto che un gene esogeno integrato in un vegetale si trasferisca accidentalmente in una pianta diversa esercitando in questa le sue funzioni. Ciò che invece sappiamo è che il Dna di cellule vegetali in deterioramento può legarsi ai componenti del terreno. Il passaggio successivo, cioè la possibilità che il Dna presente nel terreno sia in grado di provocare mutazioni genetiche di piante adiacenti, non ha, per il momento, alcun fondamento.

d) Il condizionamento dell'equilibrio batterico intestinale e quello dei batteri e degli insetti sul terreno

Il Dna contenuto nei cromosomi delle cellule che quotidianamente ingeriamo per la nostra alimentazione non si degrada in tempi brevissimi. Un gene esogeno inserito in un vegetale abitualmente consumato nella nostra dieta potrebbe accedere al Dna della flora batterica intestinale e, per questa via, alle cellule umane così come, attraverso gli escrementi, diffondersi nel territorio circostante e integrarsi nel Dna di batteri e insetti. Non si hanno prove certe che ciò avvenga spontaneamente, anche se esperimenti di laboratorio hanno mostrato che il trasferimento di geni da una pianta a un batterio è possibile. In ogni caso, è importante accertare se sul suolo di coltivazione di piante geneticamente modificate si registra un effetto del gene o dei geni estranei sui batteri e gli insetti. In caso di responso positivo si può sempre intervenire impedendo che il vegetale sia in grado di produrre la proteina responsabile o, semplicemente, ponendo il divieto di coltivazione della pianta incriminata.

e) La riduzione della biodiversità vegetale

Nei riguardi di questa giusta e necessaria preoccupazione, occorre compiere una distinzione preliminare tra:

- biodiversità in ambiente naturale;
- biodiversità nei campi coltivati.

Quando si parla di biodiversità vegetale in ambiente naturale, ci si può riferire alla diversità genetica esistente nella stessa specie o alla diversità tra le specie di uno stesso sistema. Nel primo caso, la perdita di diversità genomica limita evidentemente le capacità della specie stessa di potersi adattare a condizioni ambientali mutate; nel secondo caso, la perdita di una specie esistente limita la capacità del mondo vegetale di adattarsi alle variazioni. Le cose stanno altrimenti quando si parla di biodiversità nel contesto delle coltivazioni: ci si riferisce infatti a quelle varietà di piante che, sul piano agricolo, sono attualmente presenti in quantità sensibilmente inferiori. Ciò, evidentemente, è dovuto solo ed esclusivamente a scelte di carattere agricolo e commerciale. Le piante coltivate, infatti, si diffondono solo perché godono della protezione di chi le coltiva, lasciate a se stesse scomparirebbero quasi tutte.

In realtà, uno dei molteplici fattori che minano la biodiversità, se

non il principale, è proprio la pratica agricola. L'agricoltura non solo ha distrutto foreste e boschi convertendoli in terreno coltivabile, ma attraverso la diffusione del polline delle specie coltivate può effettivamente mettere in pericolo le specie selvatiche. Il rischio di ridurre la biodiversità, insomma, non è per niente specifico delle piante transgeniche.

I risultati inerenti ai tentativi di modificazione genetica relativa agli animali e allo stesso essere umano sono ancora estremamente problematici e costellati da insuccessi. Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che gli organismi animali presentano, almeno allo stato attuale, una capacità estremamente debole di adattarsi, senza conseguenze letali o comunque invalidanti, a modifiche apportate al loro patrimonio genetico. Incoraggianti risultati sono invece stati raggiunti in due specifici settori, di grande importanza anche per la specie umana: quello *diagnostico*, con la possibilità di accertare la presenza di talune malattie ereditarie che sicuramente si manifesteranno nell'individuo; quello *terapeutico*, dove si fa sempre più concreta la possibilità di realizzare una terapia genica umana, cioè la modificazione di un gene anomalo con l'introduzione di un gene normale nelle cellule affette. Questa terapia può essere praticata sia sulle cellule somatiche che su quelle staminali. Nei due casi, come vedremo, la valutazione etica è profondamente diversa.

4. La clonazione

Il termine deriva dal greco *klon*, che significa germoglio; con esso si fa riferimento al processo attraverso il quale si giunge alla formazione di una o più copie geneticamente identiche di una cellula o di un organismo. I *cloni* sono il risultato del processo di clonazione. Sul piano prettamente naturale, i cloni possono essere ottenuti attraverso i processi di riproduzione nei procarioti, nei protisti, nel mondo vegetale e in alcuni gruppi animali. Il significato che comunemente è associato al termine clonazione è assai più ristretto e si riferisce all'insieme delle procedure messe a punto nella biologia molecolare e nell'ingegneria genetica.

Per non incorrere in possibili confusioni tra clonazione e fecondazione, è opportuno richiamare quanto precedentemente esposto a livello di fecondazione umana. In quest'ultimo ambito, infatti, lo zigote è il prodotto dell'unione di due cellule germinali, cioè lo sper-

matozoo del maschio che reca 23 cromosomi e l'ovulo della femmina, anch'esso dotato di 23 cromosomi. L'individuo zigote assumerà così le caratteristiche di entrambi i genitori. Nella pratica della clonazione, al contrario, tutto il corredo cromosomico deriva dal nucleo di un'unica cellula somatica, che dunque presenta 46 cromosomi; sarà quest'unica cellula a determinare tutte le caratteristiche genetiche dell'eventuale clone.

In base alle finalità che si intendono perseguire, possiamo parlare di:

- clonazione genetica o cellulare;
- clonazione riproduttiva;
- clonazione terapeutica.

La *clonazione genetica o cellulare* consiste nella produzione di porzioni di Dna identici, cioè parti del patrimonio genetico di un organismo in un numero di esemplari sufficiente per poterne rendere possibile lo studio e la conoscenza. Il processo può essere condotto con due modalità. La prima procedura consiste nell'introdurre parti di Dna in cellule batteriche o di lievito che, replicandosi velocemente, danno luogo a molte copie della parte interessata. L'inserimento del Dna è reso possibile da un agente, un vettore, che a sua volta trasferisce il suo patrimonio genetico in una cellula ospite. Prima di essere inserite nel vettore, le porzioni di Dna vengono suddivise attraverso l'opera degli enzimi di restrizione che interrompono il filamento di acido nucleico in corrispondenza di una specifica base azotata. Dopo questa operazione il Dna viene introdotto in un diverso microrganismo ospite. La seconda procedura, assai recente, utilizza la reazione a catena della polimerasi.

Le applicazioni della clonazione genetica sono diverse: dalla ricerca scientifica pura, con lo studio delle caratteristiche biochimiche dei geni, alla ricerca applicata, tesa a individuare mutazioni che identificano un gene come responsabile di specifiche patologie, fino alla possibilità di produrre sostanze terapeutiche, come l'insulina, nonché la sua applicazione alla terapia genica.

La *clonazione riproduttiva* in organismi pluricellulari prevede la nascita di un nuovo individuo perfettamente identico a quello clonato. Le tecniche impiegate sono ormai diverse; quella che, in un certo senso, ha avuto maggior risalto consiste nel trasferimento di nucleo. Si tratta della tecnica che ha dato i natali alla pecora Dolly, in Scozia, nel 1997. Si è anzitutto utilizzata una cellula ovulo

non fecondata, cioè una cellula germinale con metà del corredo cromosomico, di una pecora adulta appartenente alla razza Blakface. A quest'ovulo è stato asportato il nucleo, che è stato sostituito con un secondo nucleo appartenente a una cellula somatica, cioè con l'intero patrimonio genetico, di una seconda pecora, di razza diversa dalla prima. Dopo essere stato opportunamente trattato, l'ovulo ha recepito il nuovo nucleo ed è stato impiantato in utero a una terza pecora adulta di razza uguale a quella che ha fornito l'ovulo privato del nucleo originario. Che cos'è accaduto? Che il secondo nucleo, quello di cellula somatica adulta, immesso nell'ovulo ha perso tutte le differenziazioni, è divenuto totipotente originando un esemplare perfettamente identico a quello da cui era stato prelevato. Dolly, la pecora clone, apparteneva non alla razza Blakface, ma alla razza Finn Dorset, la stessa della pecora adulta da cui era stata prelevato il nucleo che ha sostituito l'originale dell'ovulo.

La *clonazione terapeutica* è finalizzata alla produzione di un embrione, di cui è prevista l'interruzione dello sviluppo nei suoi primi stadi, per utilizzarne cellule e tessuti da trapiantare in un organismo affetto da specifiche patologie. Per produrre cellule di questo tipo si deve far ricorso alle cellule staminali che, come sappiamo, sono multipotenti o pluripotenti, dunque adatte per essere differenziate e diventare così cellule del sangue, delle ossa ecc., attraverso varie tecniche di laboratorio. Una volta differenziate come cellule di un particolare tipo, evidentemente in quelle richieste nel caso specifico, esse vengono moltiplicate e introdotte nell'organismo del paziente per sostituire le cellule malate.

ALLARME OGM?

1. Il miglioramento genetico

Sono trascorsi almeno diecimila anni dal momento in cui i nostri progenitori si accorsero che era possibile selezionare specie selvatiche di piante, animali, e persino microrganismi. Ciò è avvenuto in concomitanza con la domesticazione. Il primo animale addomesticato fu quasi sicuramente il cane, seguito dai mammiferi da allevamento come pecore, buoi, capre e maiali. Non più sottoposti ai rigidi meccanismi della selezione naturale, non solo l'alimentazione, ma anche la riproduzione, per queste specie di animali non fu più un fatto casuale ma regolato, determinato da criteri imposti dall'uomo per i suoi fini. Ha inizio, insomma, la pratica della selezione artificiale con lo scopo di ottenere un miglioramento delle caratteristiche genetiche di piante coltivate e animali allevati utilizzando la variabilità genetica già esistente e disponibile per incrementare il numero di individui con caratteristiche considerate utili e ridurre il numero di organismi considerati non interessanti dal punto di vista dei bisogni dell'uomo. In questo modo si sono selezionate razze e varietà omogenee ma diverse tra loro, perché ciascuna adatta a una determinata funzione. Al contempo, e probabilmente non intenzionalmente, i processi di fermentazione davano inizio anche alla selezione dei microrganismi.

I metodi di selezione del mondo antico si basavano su una serie di incroci, cioè l'accoppiamento di due animali e di due vegetali di specie diverse, condotti in modo *casuale* fino al conseguimento più o meno soddisfacente di un individuo con determinate, volute caratteristiche.

Le numerose varietà, peraltro attualmente presenti, ottenute con incroci *non casuali* sono state prodotte solo dopo il XVI secolo. Di ciascuna generazione di animali o piante venivano selezionati gli individui che presentavano le caratteristiche richieste; successivamente questi individui venivano poi incrociati tra loro. Tale meto-

do, che ha sicuramente ottenuto notevoli risultati, presentava tuttavia non pochi problemi:

- il processo era molto lento, insicuro e, cosa non trascurabile, dava luogo al miglioramento di individui isolati ma non a quello dei caratteri della specie;
- operando con incroci all'interno di piccole mandrie, di greggi o di coltivazioni, nell'arco di una generazione non era infrequente perdere quanto guadagnato in precedenza;
- al miglioramento di un carattere spesso si accompagnava il peggioramento di altri (se ad esempio si incrementava la produzione di latte nelle mucche, si perdeva sul piano della loro fertilità);
- negli incroci tra organismi vegetali appartenenti a specie o generi affini gli *ibridi* ottenuti, riproducendosi, non davano luogo nelle successive generazioni ai caratteri desiderati, ma regredivano all'aspetto di uno dei due genitori;
- il reincrocio, ovvero l'incrocio di un ibrido e un individuo parentale, utilizzato per determinare i caratteri voluti nella discendenza, spesso produceva organismi poco fertili e deboli.

Dalla metà del XVIII secolo fino ai primi anni del Novecento si iniziò a combinare i diversi metodi di selezione con l'*inincrocio* e con l'*esogamia*. L'inincrocio comprende tanto l'incrocio tra fratelli e fratellastri quanto il reincrocio tra figli e genitori al fine di fissare un particolare carattere. L'esogamia è invece l'accoppiamento degli individui delle razze ottenute mediante l'inincrocio con individui esterni al gruppo, anche di razze diverse; ciò permette di incrementare il vigore ed evitare che i caratteri indesiderati si accumulino, oltre a presentare il vantaggio di aumentare la variabilità e la possibilità di nuove combinazioni di caratteri. Tuttavia, solo dopo la rivisitazione del contributo fondamentale apportato dalle leggi di Gregor Johann Mendel (1822-1884), un monaco moravo, si è giunti a una vera e propria pianificazione degli incroci. Mendel aveva trattato i caratteri semplici e qualitativi di alcune piante e dimostrato che i caratteri ereditari sono trasmessi da unità, in seguito denominate geni. I caratteri ereditari, secondo Mendel non solo non si mescolano nelle generazioni successive, ma neppure vengono estromessi da altri caratteri. Così, l'attenta analisi di incroci ci consentirebbe di prevedere quali tipi di discendenza compariranno, e in quale proporzione, nella generazione successiva. Lo studio delle ri-

cerche di Mendel ha condotto ad accertare che anche la trasmissione dei caratteri quantitativi rientra nelle conclusioni a suo tempo tratte dal monaco moravo. L'introduzione dei metodi statistici ha infine reso la selezione ancor più precisa.

Attualmente, sul piano della riproduzione controllata negli animali, le tecniche si basano ancora sulla selezione fondata unicamente sulle qualità individuali, integrata da altri tre criteri:

- la selezione del pedigree, che guarda più alle qualità degli antenati che a quelle dell'individuo;
- la selezione familiare, basata sulle qualità dei parenti collaterali, quali fratelli o fratellastri;
- la selezione della discendenza, per cui si scelgono gli individui in base alle caratteristiche dei loro discendenti.

Nei riguardi della riproduzione controllata dei vegetali, anche in questo caso si utilizzano le varie forme di selezione accompagnate da tecniche di inincrocio ed esogamia, talvolta integrate da procedure quali la selezione di una linea pura e l'ibridazione. La selezione di una linea pura richiede inincroci e selezioni continui per uno o più caratteri fino alla fissazione del carattere stesso e al conseguimento di una popolazione più o meno omogenea, cioè omozigote; l'ibridazione consiste invece nell'incrocio di varietà o specie distinte per produrre appunto ibridi con una combinazione di caratteri superiore a quelli dei genitori. L'ibridazione vegetale, che si ottiene molto più facilmente e con risultati superiori rispetto a quella animale, è stata per molto tempo un passaggio fondamentale. L'unico difetto, a fronte in verità di molti pregi propri dell'ibridazione, sta nella debole fertilità che, quando è presente, non sempre consente la trasmissione dei caratteri voluti alla generazione successiva; ogni stagione si devono così selezionare nuovi ibridi.

Bisogna infine precisare che, nell'ambito dei vegetali, vi sono differenze importanti relative alle caratteristiche della riproduzione. In effetti, oltre alla normale impollinazione molte piante, diversamente dagli animali, sono in grado di autofecondarsi o autoimpollinarsi, ossia di fecondare la cellula uovo con il polline che l'individuo stesso produce. L'impollinazione incrociata produce comunque maggiore variabilità genetica rispetto all'autofecondazione, che caratterizza piante quali il grano, l'orzo, i fagioli, i piselli, i pomodori ecc.

Risalgono agli anni Sessanta del secolo appena trascorso le tecniche elaborate in vista di ottenere artificialmente la variabilità genetica, tecniche che vanno sotto il nome di *mutagenesi*. I geni mutano, cambiano spontaneamente, e questa mutazione può essere condizionata, nel senso che la sua frequenza può essere aumentata se gli organismi in oggetto (sempre e comunque vegetali perché gli animali non resistono all'intervento) sono sottoposti a radiazioni o a determinate sostanze chimiche. Le mutazioni geniche sono semplicemente il cambiamento di una o più basi azotate nel Dna che in generale, anche se non sempre, comportano una parallela modificazione nella catena di amminoacidi (nella proteina) corrispondenti. La funzione del gene viene così leggermente modificata, quel tanto che basta per cambiare il fenotipo dell'individuo. Tuttavia, come appare evidente, anche in questo caso non si introducono nuove funzioni, ma si interviene agendo su quelle già fissate dall'evoluzione naturale.

Nel caso dell'utilizzazione e del controllo dei microrganismi, vi sono almeno quattro ambiti esemplificativi:

- la pratica della vinificazione, dove i lieviti utilizzati sono usati per la trasformazione degli zuccheri in alcol etilico e la modificazione del mosto in vino. Si tratta di procedure che richiedono complesse reazioni chimiche che portano alla produzione delle molecole responsabili del gusto e dei profumi dei vini;
- la produzione dei derivati del latte, dove la tipicità del prodotto dipende in gran parte, come nel caso precedente, dagli enzimi responsabili della fermentazione;
- l'uso di microrganismi nella coltivazione delle leguminose. In questo particolare caso, si utilizzano specifici batteri che si insinuano nelle radici delle piante e fissano l'azoto atmosferico che i vegetali assumono come nutrimento (relazione di simbiosi). Peraltro, parte di questo azoto resta nel terreno e dunque può essere utilmente assorbito anche dalle generazioni successive. È opportuno osservare che in questo ambito sono utilizzati anche mutanti degli stessi microrganismi. I batteri, infatti, se contengono un solo cromosoma principale, dispongono però, come già è stato evidenziato, di una serie di elementi genetici autonomi detti plasmidi, che si scambiano con facilità anche con specie assai lontane. Non solo: molti batteri sono in grado di integrare nel loro patrimonio genetico frammenti di Dna che rintracciano nell'ambiente circostante attraverso una vera e propria trasformazione;

- la produzione di sostanze farmaceutiche, cioè molecole che, utilizzate singolarmente o insieme ad altre, permettono una certa efficacia nella cura di alcune specifiche affezioni. Le tecniche seguite sono quelle note, dall'incrocio alla selezione, alla mutagenesi, alla trasformazione, sfruttando la relativa semplicità dei genomi batterici.

2. Ingegneria genetica

Si tratta dell'insieme delle tecniche messe in atto per modificare in modo *predeterminato* le caratteristiche ereditarie di un organismo, alterandone il materiale genetico. Si faccia bene attenzione alla definizione appena espressa, soprattutto allorché si precisa che le operazioni eseguite modificano in modo *predeterminato* certe caratteristiche. In questo caso, adottare delle tecniche o delle strategie significa aver in precedenza elaborato un piano ben preciso: un progetto! Non è dunque casuale, bensì altamente pertinente, l'uso che, in questa circostanza, si fa del termine "ingegneria", perché proprio l'ingegnere determina prima dei piani, dei progetti, che lui stesso controlla nelle diverse fasi della loro attuazione, che si tratti della costruzione di un edificio, di una strada, di un meccanismo. In questo senso, benché ciò possa apparire poco elegante, l'ingegneria genetica considera gli esseri viventi alla stessa stregua di meccanismi che risultano così costituiti secondo uno specifico progetto, custodito nel Dna, i cui pezzi, cioè i geni, sono considerati non solo indipendenti tra loro, ma persino sostituibili una volta che ne è stata stabilita e conosciuta la funzione.

Le procedure e le tecniche messe in atto dall'ingegneria genetica consistono appunto nella possibilità di isolare un gene (che come sappiamo ha l'informazione necessaria per la produzione delle proteine), per poi inserirlo nel corredo ereditario di un altro organismo, diverso da quello nel quale è stato isolato il nostro gene. Per questo motivo, l'ingegneria genetica è anche denominata tecnologia del Dna ricombinante: proprio perché implica la manipolazione del Dna.

Per poter operare la manipolazione sono necessari alcuni strumenti fondamentali: gli *enzimi di restrizione*. Si tratta di enzimi che vengono prodotti da diverse specie di batteri. Il loro compito consiste nel riconoscere una sequenza specifica all'interno di una molecola di Dna. Una volta riconosciuta, su questa sequenza viene operato un

- la produzione di sostanze farmaceutiche, cioè molecole che, utilizzate singolarmente o insieme ad altre, permettono una certa efficacia nella cura di alcune specifiche affezioni. Le tecniche seguite sono quelle note, dall'incrocio alla selezione, alla mutagenesi, alla trasformazione, sfruttando la relativa semplicità dei genomi batterici.

2. Ingegneria genetica

Si tratta dell'insieme delle tecniche messe in atto per modificare in modo *predeterminato* le caratteristiche ereditarie di un organismo, alterandone il materiale genetico. Si faccia bene attenzione alla definizione appena espressa, soprattutto allorché si precisa che le operazioni eseguite modificano in modo *predeterminato* certe caratteristiche. In questo caso, adottare delle tecniche o delle strategie significa aver in precedenza elaborato un piano ben preciso: un progetto! Non è dunque casuale, bensì altamente pertinente, l'uso che, in questa circostanza, si fa del termine "ingegneria", perché proprio l'ingegnere determina prima dei piani, dei progetti, che lui stesso controlla nelle diverse fasi della loro attuazione, che si tratti della costruzione di un edificio, di una strada, di un meccanismo. In questo senso, benché ciò possa apparire poco elegante, l'ingegneria genetica considera gli esseri viventi alla stessa stregua di meccanismi che risultano così costituiti secondo uno specifico progetto, custodito nel Dna, i cui pezzi, cioè i geni, sono considerati non solo indipendenti tra loro, ma persino sostituibili una volta che ne è stata stabilita e conosciuta la funzione.

Le procedure e le tecniche messe in atto dall'ingegneria genetica consistono appunto nella possibilità di isolare un gene (che come sappiamo ha l'informazione necessaria per la produzione delle proteine), per poi inserirlo nel corredo ereditario di un altro organismo, diverso da quello nel quale è stato isolato il nostro gene. Per questo motivo, l'ingegneria genetica è anche denominata tecnologia del Dna ricombinante: proprio perché implica la manipolazione del Dna.

Per poter operare la manipolazione sono necessari alcuni strumenti fondamentali: gli *enzimi di restrizione*. Si tratta di enzimi che vengono prodotti da diverse specie di batteri. Il loro compito consiste nel riconoscere una sequenza specifica all'interno di una molecola di Dna. Una volta riconosciuta, su questa sequenza viene operato un

vero e proprio taglio. In questo modo si generano frammenti di Dna originari di specie diverse che custodiscono al loro interno geni o sequenze ritenute interessanti o utili, frammenti che possono essere uniti ad altre molecole di Dna mediante particolari enzimi chiamati *ligasi*.

Come è facile capire, abbiamo costruito una combinazione di Dna che prima non esisteva e che non si sarebbe mai potuta creare spontaneamente. Il nuovo Dna, ottenuto combinando insieme frammenti che provengono da specie diverse, si è soliti chiamarlo Dna ricombinante (rDna).

Per inserire geni alieni nei batteri sono disponibili più tipi di vettori, tra i quali ve ne sono di idonei anche per la trasformazione di vegetali e organismi animali. Nel caso dei batteri, i vettori possono ben essere dei virus, e in tal caso il gene inserito viene integrato stabilmente nell'unico cromosoma del batterio oppure particolari molecole capaci di riprodursi autonomamente nell'ospite, dette *plasmidi*. Per far entrare nell'ospite il vettore, che già dispone del nuovo gene, è sufficiente trattare i batteri con una soluzione che contiene il Dna ricombinante.

L'inserimento di geni nei vegetali e negli animali richiede procedure più complesse.

Nel caso dei vegetali, come sappiamo, le cellule sono circondate da una parete molto resistente che impedisce al Dna un passaggio spontaneo. Per aggirare la difficoltà sono state elaborate diverse tecniche, tra le quali le seguenti:

- privare la cellula vegetale della parete mediante l'azione di particolari enzimi; le cellule senza le pareti vengono poi immerse in una "soluzione" di Dna che, a questo punto, ha facilità di accesso. Il limite di questa procedura sta nel fatto che, una volta inserito il Dna, è assai difficile ricostruire le pareti;
- bombardare le cellule con proiettili microscopici ricoperti di Dna provvisto del gene da inserire (tecnica biobalistica). Il bombardamento non è casuale: privilegia le cellule presenti nelle parti della pianta dove la fase di divisione cellulare è maggiormente prolungata, ovvero le parti che originano i fiori. Si aumentano così le probabilità che ovuli e polline siano trasformati dando il via a una generazione di semi e di piante geneticamente modificate;
- sfruttare l'azione di due batteri patogeni: l'*Agrobacterium tumefaciens* e l'*Agrobacterium rhizogenes*. Quando questi due batteri

infettano un vegetale, inseriscono spontaneamente nella pianta alcuni dei loro geni. Una parte dei geni inseriti consente alle cellule della pianta di sintetizzare determinati ormoni che inducono la divisione cellulare col risultato che se il batterio utilizzato è l'*Agrobacterium tumefaciens*, avremo la formazione di galle, nel caso invece dell'*Agrobacterium rhizogenes*, otterremo le radici. Altri geni consentono la sintesi di molecole nutritive dell'agente patogeno inserito. A questo punto, per trasferire nella pianta uno o più geni che consideriamo utili, non faremo altro che togliere al plasmidio i geni responsabili della sintesi ormonale e inserire al loro posto quelli prescelti.

Negli animali, compresi gli esseri umani, il vettore è generalmente un virus cui è stata asportata la parte di geni che lo renderebbero pericoloso per l'ospite. Rigenerare un intero organismo con poche cellule già in parte differenziate è tuttavia impresa estremamente difficile; per questo motivo, normalmente si procede alla trasformazione di cellule embrionali appena sviluppate o a cellule staminali. In tal caso, il nucleo della cellula trattata viene trasferito in una cellula uovo normale, ma privata del nucleo. La cellula modificata sarà poi impiantata in utero dove si svilupperà fino alla nascita del nuovo organismo.

Nonostante il rapidissimo sviluppo di tecniche sempre più sofisticate, la manipolazione genetica sul versante vegetale e animale comporta una serie di problemi che si manifestano meno nel caso dei batteri, data la loro struttura più semplice. Anzitutto, non è possibile prevedere esattamente quante copie del gene esogeno o alieno si inseriranno nelle cellule trattate né in quale parte del genoma dell'ospite si collocheranno. Si tratta di due aspetti molto rilevanti dal momento che un maggior numero di copie del gene esogeno potrebbe implicare una maggiore attività del gene stesso con conseguente produzione di quantità non previste della proteina corrispondente; il frammento inserito potrebbe poi finire in un gene dell'ospite e renderlo inattivo, eventualità che potrebbe arrecare danni all'organismo trasformato. In secondo luogo, nel corso del processo di trasferimento, il gene introdotto può cambiare e risultare inattivo una volta integrato nell'ospite. Nel caso delle piante, infine, quando si opera con vegetali su un terreno nutritivo artificiale può accadere che, prima del loro sviluppo come organismi normali, subiscano modifiche spontanee del loro patrimonio gene-

tico perché il periodo di passaggio in vitro ne aumenta la frequenza. Queste mutazioni, in ogni caso non previste, si trasmetteranno alle successive generazioni.

3. Organismi geneticamente modificati

Da quando l'uomo ha intrapreso l'attività di allevatore e di coltivatore, non era mai stato in grado di operare interventi di miglioramento delle specie con un altissimo grado di precisione quale quello che le attuali tecniche dell'ingegneria genetica mettono a disposizione. Fino ad almeno due decenni or sono, le procedure messe in atto per migliorare microrganismi, piante e animali si esaurivano sostanzialmente nella mutagenesi e nell'incrocio tra individui sessualmente compatibili. Allo stato attuale possiamo con ragione parlare di organismi geneticamente modificati (*Ogm*), riferendoci esclusivamente ai *microrganismi* e alle *piante* il cui Dna è stato modificato con l'introduzione di un gene estraneo proveniente da un altro organismo vivente, dal quale è stato isolato e prelevato. Detto in altri termini, oggi siamo in grado, perché ne possediamo le conoscenze teoriche e le tecniche procedurali, di trasferire geni esogeni in microrganismi e in piante in modo tale da conseguire una stabile integrazione del gene proveniente dall'esterno sul loro Dna. Resta inteso che il gene isolato proviene da un accurato esame selettivo e dalla scelta tra i geni che più si avvicinano alle caratteristiche che vogliamo trovare una volta realizzato il processo di modificazione.

I risultati che la pratica della modificazione genetica dei microrganismi ci propone abbracciano, con maggiore e minore successo, tre campi: quello farmaceutico, quello industriale e quello agricolo.

Il campo *farmaceutico* è indubbiamente l'ambito che suscita immediatamente maggior interesse, per ovvi motivi. Anche noi esseri umani abbiamo infatti in dotazione dei geni che sono predisposti alla produzione di proteine di grande importanza per la nostra sopravvivenza. Come già abbiamo avuto modo di sottolineare, un certo numero di queste proteine regolano una serie di processi vitali, altre intervengono in passaggi fondamentali del nostro sistema metabolico; vi sono infine delle proteine che ci consentono di riconoscere i segnali provenienti dall'interno o dall'esterno e di trasmetterli ai geni incaricati di fornire una risposta. La carenza di

tico perché il periodo di passaggio in vitro ne aumenta la frequenza. Queste mutazioni, in ogni caso non previste, si trasmetteranno alle successive generazioni.

3. Organismi geneticamente modificati

Da quando l'uomo ha intrapreso l'attività di allevatore e di coltivatore, non era mai stato in grado di operare interventi di miglioramento delle specie con un altissimo grado di precisione quale quello che le attuali tecniche dell'ingegneria genetica mettono a disposizione. Fino ad almeno due decenni or sono, le procedure messe in atto per migliorare microrganismi, piante e animali si esaurivano sostanzialmente nella mutagenesi e nell'incrocio tra individui sessualmente compatibili. Allo stato attuale possiamo con ragione parlare di organismi geneticamente modificati (*Ogm*), riferendoci esclusivamente ai *microrganismi* e alle *piante* il cui Dna è stato modificato con l'introduzione di un gene estraneo proveniente da un altro organismo vivente, dal quale è stato isolato e prelevato. Detto in altri termini, oggi siamo in grado, perché ne possediamo le conoscenze teoriche e le tecniche procedurali, di trasferire geni esogeni in microrganismi e in piante in modo tale da conseguire una stabile integrazione del gene proveniente dall'esterno sul loro Dna. Resta inteso che il gene isolato proviene da un accurato esame selettivo e dalla scelta tra i geni che più si avvicinano alle caratteristiche che vogliamo trovare una volta realizzato il processo di modificazione.

I risultati che la pratica della modificazione genetica dei microrganismi ci propone abbracciano, con maggiore e minore successo, tre campi: quello farmaceutico, quello industriale e quello agricolo.

Il campo *farmaceutico* è indubbiamente l'ambito che suscita immediatamente maggior interesse, per ovvi motivi. Anche noi esseri umani abbiamo infatti in dotazione dei geni che sono predisposti alla produzione di proteine di grande importanza per la nostra sopravvivenza. Come già abbiamo avuto modo di sottolineare, un certo numero di queste proteine regolano una serie di processi vitali, altre intervengono in passaggi fondamentali del nostro sistema metabolico; vi sono infine delle proteine che ci consentono di riconoscere i segnali provenienti dall'interno o dall'esterno e di trasmetterli ai geni incaricati di fornire una risposta. La carenza di

proteine, come ben si capisce, destabilizza il normale funzionamento dell'organismo, sicché è doveroso e vitale intervenire. L'ingegneria genetica ci consente di dare una risposta efficace a questa mancanza, perché ci offre la possibilità di isolare il gene cui fa capo la proteina insufficiente. Dopo questo passo, si tratterà di inserire il gene individuato in un batterio che, adeguatamente istruito, sarà indotto a produrre la proteina che c'interessa. Potremo così coltivare un microrganismo e da esso estrarre la proteina richiesta che, opportunamente purificata, potrà essere utilizzata per sopperire al nostro scempenso con un indiscutibile vantaggio rispetto a qualsiasi altro modo di procurarci la cura. Potremo in effetti disporre in quantità praticamente illimitata di proteine che, sul piano qualitativo, presentano un elevatissimo grado di purezza e, soprattutto, sono identiche a quelle umane così da rendere altamente improbabile l'insorgere di allergie. La produzione di insulina (un ormone proteico che fa capo al pancreas e principale responsabile del metabolismo dei carboidrati), essenziale per la cura del diabete mellito, è la risultante concreta delle prospettive che, su questo piano, può aprire l'ingegneria genetica. Fino a vent'anni fa, l'insulina veniva estratta dai suini, purificata e impiegata. Il prodotto, oltre a essere costoso, risultava e risulta qualitativamente inferiore all'insulina ottenuta dal Dna ricombinante, con l'aggravante di non poter escludere forme di allergia.

Nel campo *industriale*, è possibile realizzare la sintesi biologica di proteine capaci di eliminare molte sostanze inquinanti, residui di lavorazione ecc. anche se bisogna precisare che, grazie alla variabilità dei geni batterici e di altri microrganismi, spesso è sufficiente isolare i ceppi ritenuti idonei ai diversi usi. Molti batteri, in effetti, presentano plasmidi portatori di geni da cui traggono origine particolari enzimi in grado di distruggere sostanze inquinanti come i derivati del petrolio e altre sostanze tossiche. Il fatto poi che i batteri si scambino i plasmidi rende possibile far sì che singoli ceppi di batteri possano essere messi in condizione di intervenire ed eliminare più di una sostanza tossica. In questo contesto, le tecniche di ingegneria genetica possono intervenire per incrementare la quantità di enzimi considerati utili.

In campo *agricolo*, il Dna ricombinante può ottimizzare le interazioni tra certi batteri e le piante. Come già abbiamo avuto modo di osservare, determinate specie di leguminose, come il pisello, il fagiolo, la lenticchia, vivono in simbiosi con alcuni batteri che hanno

la caratteristica di fissare l'azoto e, con esso, costruire composti che servono da nutrimento alle piante; da parte loro, queste ultime forniscono energia ai batteri attraverso le scorie.

La modificazione dei vegetali è indiscutibilmente il settore che, anche sul piano dell'opinione pubblica, ha destato non poche perplessità e preoccupazioni nei riguardi dell'uso delle nuove metodologie elaborate dagli ingegneri genetici. Una pianta è geneticamente modificata allorché si è provveduto a inserire nel suo Dna un gene che è stato isolato da un altro organismo vivente; e poiché i vegetali hanno un'importanza non marginale per l'alimentazione umana e no, ben si comprende il vero e proprio allarme che la loro modifica ha suscitato circa l'impatto che eventuali coltivazioni potrebbero avere sull'ambiente e sulla salute dell'uomo. Tanto è vero che prima dell'introduzione delle procedure di miglioramento genetico mediante Dna ricombinante non si poneva e non si era mai posto il problema di richiedere valutazioni di sicurezza nei confronti delle piante coltivate. In vista della loro commercializzazione ci si limitava a selezionare e a registrare nuove varietà di vegetali solo sulla base di criteri agronomici, quali la resa, la resistenza ai parassiti e a stress abiotici; criteri organolettici, come il sapore e il profumo o semplicemente commerciali, ad esempio la deperibilità del prodotto, l'interesse da esso suscitato sul mercato. Raramente un particolare vegetale veniva sottoposto a esami tesi a darne una caratterizzazione dal punto di vista chimico. Per converso, nel caso in cui il miglioramento genetico delle piante coltivate preveda l'utilizzo di tecniche proprie dell'ingegneria genetica, sono richieste rigorose ed esaustive analisi chiamate a rispondere a severi obblighi legislativi ancor prima che ne venga rilasciata l'autorizzazione per l'impiego sia agricolo sia biomedico. Eppure, a priori, e come vedremo anche a posteriori, chi può affermare che lo stesso uso delle colture tradizionali è esente da rischi ambientali e per la salute? Le preoccupazioni per l'impatto delle piante geneticamente modificate sull'ambiente sono molteplici, e tutte considerate rilevanti.

a) La dispersione delle sementi

Come le piante tradizionali, anche quelle geneticamente modificate si riproducono attraverso la formazione di semi che, in un caso come nell'altro, possono essere dispersi nell'ambiente; tipico è l'esempio del mais. La dispersione nell'ambiente avviene in genere al mo-

mento della raccolta, del trasporto ai magazzini e nel corso della commercializzazione. Il fatto non è mai stato posto all'attenzione e alla preoccupazione generale anche perché il mais non è un vegetale invasivo: per poter crescere e prosperare necessita dell'intervento dell'uomo; in mancanza della sua cura e assistenza, è destinato a soccombere. Nel caso di un prodotto geneticamente modificato, ad esempio mais transgenico, nonostante le rassicurazioni che provengono da sperimentazioni accurate, il problema viene sollevato paventando turbamenti dell'equilibrio ambientale. In realtà, ciò potrebbe accadere solo nel caso in cui il gene o i geni inseriti fossero in grado di garantire alla pianta uno *status* altamente competitivo rispetto ai vegetali selvatici dell'ambiente circostante. Una simile eventualità può essere evidentemente scongiurata sia astenendosi dal modificare in tal senso il Dna della pianta in questione sia, nel caso dovesse presentarsi un simile e indesiderato effetto, inserendo un carattere di sterilità che impedisca lo sviluppo dei semi. La questione, è opportuno precisarlo, si è posta per la prima volta non in ambito transgenico ma tradizionale, precisamente con i pioppi ibridi che, diffondendo i loro semi, sviluppano piante invasive.

b) La fecondazione attraverso il polline di piante sessualmente compatibili

Il timore che il polline di piante transgeniche sia in grado di fecondare l'ovulo di vegetali sessualmente compatibili, dando così il via alla creazione di ibridi che potrebbero rivelarsi infestanti, è particolarmente avvertito. La preoccupazione non è infondata: tutt'altro, dal momento che il fenomeno si registra, e si è sempre registrato, nelle colture tradizionali. La diffusione del polline nell'ambiente porta alla fecondazione di altre piante producendo nuove combinazioni genomiche. Si tratta, in buona sostanza, di ibridi che risultano in effetti invasivi quando posseggono vantaggi selettivi; in caso contrario sono destinati a soccombere. Nel caso di piante geneticamente modificate, per motivi di chiarezza, è tuttavia necessario distinguere due diverse situazioni:

- quella in cui il gene estraneo è introdotto *nel Dna del nucleo*;
- quella in cui il gene esogeno è inserito *nel Dna del cloroplasto*.

La distinzione è fondamentale perché, come ben sappiamo, nel primo caso l'ereditarietà segue le leggi di Mendel, sicché i cromosomi di

ciascuna coppia di geni sono ripartiti nel polline e nell'ovulo; nel secondo caso, l'ereditarietà è per via materna, solo attraverso l'ovulo, sicché quest'ultimo risulterà geneticamente modificato mentre il polline non lo sarà, visto che è privo di cloroplasto, fatte salve le dovute eccezioni come nel caso delle conifere.

Attualmente, i vegetali transgenici rientrano tutti nel primo caso, con i geni esogeni inseriti nel nucleo. Ciò comporta una verifica scrupolosa dell'eventualità, tutt'altro che remota, che il polline geneticamente modificato sia capace di impollinare vegetali dell'ambiente circostante determinando la comparsa di piante geneticamente modificate. Dal momento che il fenomeno può di per sé presentarsi in natura, c'è da presumere che difficilmente il vegetale transgenico si comporterà diversamente, il che implica l'adozione di determinate strategie di valutazione caso per caso dopo aver verificato i modi e le circostanze attraverso le quali la pianta in esame si diffonde nell'ambiente. Si dovrà procedere caso per caso per due ordini di motivi: anzitutto, perché ogni pianta adotta diverse strategie per conseguire il fine della fecondazione; in secondo luogo, dal momento che è necessario valutare correttamente l'eventuale tasso di vantaggio selettivo conferito dal gene o dai geni alla pianta ibrida. Nell'eventualità che ciò si presenti, è possibile adottare due misure: invocare il divieto di commercializzazione della pianta transgenica o imporre che il gene o i geni siano integrati nel Dna del cloroplasto, se è possibile.

c) Il trasferimento diretto del gene esogeno nel Dna di vegetali non sessualmente compatibili

È assodato che, in natura, può aver luogo un trasferimento genico: i batteri che scambiano geni contenuti nei loro plasmidi lo dimostrano. La preoccupazione, su questo piano, è che il trasferimento spontaneo del gene estraneo nel Dna di vegetali presenti nelle vicinanze, benché non sessualmente compatibili, possa potenziare o dotare questi ultimi di capacità selettive rilevanti rendendoli infestanti. Allo stato attuale delle ricerche, non è disponibile una dimostrazione del fatto che un gene esogeno integrato in un vegetale si trasferisca accidentalmente in una pianta diversa esercitando in questa le sue funzioni. Ciò che invece sappiamo è che il Dna di cellule vegetali in deterioramento può legarsi ai componenti del terreno. Il passaggio successivo, cioè la possibilità che il Dna presente nel terreno sia in grado di provocare mutazioni genetiche di piante adiacenti, non ha, per il momento, alcun fondamento.

d) Il condizionamento dell'equilibrio batterico intestinale e quello dei batteri e degli insetti sul terreno

Il Dna contenuto nei cromosomi delle cellule che quotidianamente ingeriamo per la nostra alimentazione non si degrada in tempi brevissimi. Un gene esogeno inserito in un vegetale abitualmente consumato nella nostra dieta potrebbe accedere al Dna della flora batterica intestinale e, per questa via, alle cellule umane così come, attraverso gli escrementi, diffondersi nel territorio circostante e integrarsi nel Dna di batteri e insetti. Non si hanno prove certe che ciò avvenga spontaneamente, anche se esperimenti di laboratorio hanno mostrato che il trasferimento di geni da una pianta a un batterio è possibile. In ogni caso, è importante accertare se sul suolo di coltivazione di piante geneticamente modificate si registra un effetto del gene o dei geni estranei sui batteri e gli insetti. In caso di responso positivo si può sempre intervenire impedendo che il vegetale sia in grado di produrre la proteina responsabile o, semplicemente, ponendo il divieto di coltivazione della pianta incriminata.

e) La riduzione della biodiversità vegetale

Nei riguardi di questa giusta e necessaria preoccupazione, occorre compiere una distinzione preliminare tra:

- biodiversità in ambiente naturale;
- biodiversità nei campi coltivati.

Quando si parla di biodiversità vegetale in ambiente naturale, ci si può riferire alla diversità genetica esistente nella stessa specie o alla diversità tra le specie di uno stesso sistema. Nel primo caso, la perdita di diversità genomica limita evidentemente le capacità della specie stessa di potersi adattare a condizioni ambientali mutate; nel secondo caso, la perdita di una specie esistente limita la capacità del mondo vegetale di adattarsi alle variazioni. Le cose stanno altrimenti quando si parla di biodiversità nel contesto delle coltivazioni: ci si riferisce infatti a quelle varietà di piante che, sul piano agricolo, sono attualmente presenti in quantità sensibilmente inferiori. Ciò, evidentemente, è dovuto solo ed esclusivamente a scelte di carattere agricolo e commerciale. Le piante coltivate, infatti, si diffondono solo perché godono della protezione di chi le coltiva, lasciate a se stesse scomparirebbero quasi tutte.

In realtà, uno dei molteplici fattori che minano la biodiversità, se

non il principale, è proprio la pratica agricola. L'agricoltura non solo ha distrutto foreste e boschi convertendoli in terreno coltivabile, ma attraverso la diffusione del polline delle specie coltivate può effettivamente mettere in pericolo le specie selvatiche. Il rischio di ridurre la biodiversità, insomma, non è per niente specifico delle piante transgeniche.

I risultati inerenti ai tentativi di modificazione genetica relativa agli animali e allo stesso essere umano sono ancora estremamente problematici e costellati da insuccessi. Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che gli organismi animali presentano, almeno allo stato attuale, una capacità estremamente debole di adattarsi, senza conseguenze letali o comunque invalidanti, a modifiche apportate al loro patrimonio genetico. Incoraggianti risultati sono invece stati raggiunti in due specifici settori, di grande importanza anche per la specie umana: quello *diagnostico*, con la possibilità di accertare la presenza di talune malattie ereditarie che sicuramente si manifesteranno nell'individuo; quello *terapeutico*, dove si fa sempre più concreta la possibilità di realizzare una terapia genica umana, cioè la modificazione di un gene anomalo con l'introduzione di un gene normale nelle cellule affette. Questa terapia può essere praticata sia sulle cellule somatiche che su quelle staminali. Nei due casi, come vedremo, la valutazione etica è profondamente diversa.

4. La clonazione

Il termine deriva dal greco *klon*, che significa germoglio; con esso si fa riferimento al processo attraverso il quale si giunge alla formazione di una o più copie geneticamente identiche di una cellula o di un organismo. I *cloni* sono il risultato del processo di clonazione. Sul piano prettamente naturale, i cloni possono essere ottenuti attraverso i processi di riproduzione nei procarioti, nei protisti, nel mondo vegetale e in alcuni gruppi animali. Il significato che comunemente è associato al termine clonazione è assai più ristretto e si riferisce all'insieme delle procedure messe a punto nella biologia molecolare e nell'ingegneria genetica.

Per non incorrere in possibili confusioni tra clonazione e fecondazione, è opportuno richiamare quanto precedentemente esposto a livello di fecondazione umana. In quest'ultimo ambito, infatti, lo zigote è il prodotto dell'unione di due cellule germinali, cioè lo sper-

non il principale, è proprio la pratica agricola. L'agricoltura non solo ha distrutto foreste e boschi convertendoli in terreno coltivabile, ma attraverso la diffusione del polline delle specie coltivate può effettivamente mettere in pericolo le specie selvatiche. Il rischio di ridurre la biodiversità, insomma, non è per niente specifico delle piante transgeniche.

I risultati inerenti ai tentativi di modificazione genetica relativa agli animali e allo stesso essere umano sono ancora estremamente problematici e costellati da insuccessi. Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che gli organismi animali presentano, almeno allo stato attuale, una capacità estremamente debole di adattarsi, senza conseguenze letali o comunque invalidanti, a modifiche apportate al loro patrimonio genetico. Incoraggianti risultati sono invece stati raggiunti in due specifici settori, di grande importanza anche per la specie umana: quello *diagnostico*, con la possibilità di accertare la presenza di talune malattie ereditarie che sicuramente si manifesteranno nell'individuo; quello *terapeutico*, dove si fa sempre più concreta la possibilità di realizzare una terapia genica umana, cioè la modificazione di un gene anomalo con l'introduzione di un gene normale nelle cellule affette. Questa terapia può essere praticata sia sulle cellule somatiche che su quelle staminali. Nei due casi, come vedremo, la valutazione etica è profondamente diversa.

4. La clonazione

Il termine deriva dal greco *klon*, che significa germoglio; con esso si fa riferimento al processo attraverso il quale si giunge alla formazione di una o più copie geneticamente identiche di una cellula o di un organismo. I *cloni* sono il risultato del processo di clonazione. Sul piano prettamente naturale, i cloni possono essere ottenuti attraverso i processi di riproduzione nei procarioti, nei protisti, nel mondo vegetale e in alcuni gruppi animali. Il significato che comunemente è associato al termine clonazione è assai più ristretto e si riferisce all'insieme delle procedure messe a punto nella biologia molecolare e nell'ingegneria genetica.

Per non incorrere in possibili confusioni tra clonazione e fecondazione, è opportuno richiamare quanto precedentemente esposto a livello di fecondazione umana. In quest'ultimo ambito, infatti, lo zigote è il prodotto dell'unione di due cellule germinali, cioè lo sper-

matozoo del maschio che reca 23 cromosomi e l'ovulo della femmina, anch'esso dotato di 23 cromosomi. L'individuo zigote assumerà così le caratteristiche di entrambi i genitori. Nella pratica della clonazione, al contrario, tutto il corredo cromosomico deriva dal nucleo di un'unica cellula somatica, che dunque presenta 46 cromosomi; sarà quest'unica cellula a determinare tutte le caratteristiche genetiche dell'eventuale clone.

In base alle finalità che si intendono perseguire, possiamo parlare di:

- clonazione genetica o cellulare;
- clonazione riproduttiva;
- clonazione terapeutica.

La *clonazione genetica o cellulare* consiste nella produzione di porzioni di Dna identici, cioè parti del patrimonio genetico di un organismo in un numero di esemplari sufficiente per poterne rendere possibile lo studio e la conoscenza. Il processo può essere condotto con due modalità. La prima procedura consiste nell'introdurre parti di Dna in cellule batteriche o di lievito che, replicandosi velocemente, danno luogo a molte copie della parte interessata. L'inserimento del Dna è reso possibile da un agente, un vettore, che a sua volta trasferisce il suo patrimonio genetico in una cellula ospite. Prima di essere inserite nel vettore, le porzioni di Dna vengono suddivise attraverso l'opera degli enzimi di restrizione che interrompono il filamento di acido nucleico in corrispondenza di una specifica base azotata. Dopo questa operazione il Dna viene introdotto in un diverso microrganismo ospite. La seconda procedura, assai recente, utilizza la reazione a catena della polimerasi.

Le applicazioni della clonazione genetica sono diverse: dalla ricerca scientifica pura, con lo studio delle caratteristiche biochimiche dei geni, alla ricerca applicata, tesa a individuare mutazioni che identificano un gene come responsabile di specifiche patologie, fino alla possibilità di produrre sostanze terapeutiche, come l'insulina, nonché la sua applicazione alla terapia genica.

La *clonazione riproduttiva* in organismi pluricellulari prevede la nascita di un nuovo individuo perfettamente identico a quello clonato. Le tecniche impiegate sono ormai diverse; quella che, in un certo senso, ha avuto maggior risalto consiste nel trasferimento di nucleo. Si tratta della tecnica che ha dato i natali alla pecora Dolly, in Scozia, nel 1997. Si è anzitutto utilizzata una cellula ovulo

non fecondata, cioè una cellula germinale con metà del corredo cromosomico, di una pecora adulta appartenente alla razza Blakface. A quest'ovulo è stato asportato il nucleo, che è stato sostituito con un secondo nucleo appartenente a una cellula somatica, cioè con l'intero patrimonio genetico, di una seconda pecora, di razza diversa dalla prima. Dopo essere stato opportunamente trattato, l'ovulo ha recepito il nuovo nucleo ed è stato impiantato in utero a una terza pecora adulta di razza uguale a quella che ha fornito l'ovulo privato del nucleo originario. Che cos'è accaduto? Che il secondo nucleo, quello di cellula somatica adulta, immesso nell'ovulo ha perso tutte le differenziazioni, è divenuto totipotente originando un esemplare perfettamente identico a quello da cui era stato prelevato. Dolly, la pecora clone, apparteneva non alla razza Blakface, ma alla razza Finn Dorset, la stessa della pecora adulta da cui era stata prelevato il nucleo che ha sostituito l'originale dell'ovulo.

La *clonazione terapeutica* è finalizzata alla produzione di un embrione, di cui è prevista l'interruzione dello sviluppo nei suoi primi stadi, per utilizzarne cellule e tessuti da trapiantare in un organismo affetto da specifiche patologie. Per produrre cellule di questo tipo si deve far ricorso alle cellule staminali che, come sappiamo, sono multipotenti o pluripotenti, dunque adatte per essere differenziate e diventare così cellule del sangue, delle ossa ecc., attraverso varie tecniche di laboratorio. Una volta differenziate come cellule di un particolare tipo, evidentemente in quelle richieste nel caso specifico, esse vengono moltiplicate e introdotte nell'organismo del paziente per sostituire le cellule malate.

INFORMAZIONE

1. Che cos'è l'informatica

L'intera esistenza umana, tanto dal punto di vista biologico e individuale, quanto da quello sociale, di relazione con i nostri simili, può ben essere caratterizzata con l'ausilio del termine "informazione". Infatti, se da un lato le nostre cellule si trasmettono delle informazioni, comunicano tra loro e con l'esterno, dall'altro lato, per il fatto di essere animali sociali, possiamo distinguere almeno tre forme di comunicazione e, dunque, di relazione. Anzitutto, la relazione tra i sessi, che dà luogo alla parentela; poi la relazione che ha per oggetto i beni, siano essi materiali o meno, che genera l'economia; infine, la relazione dei nostri contenuti di coscienza, ossia ciò che comprendiamo, che sentiamo e vogliamo, che origina il linguaggio: forma quest'ultima alla quale, come è agevole capire, le due precedenti si ricollegano e, grazie alla quale, si realizzano pienamente nella nostra umanità.

In senso stretto, il termine linguaggio dovrebbe dunque esser usato facendo riferimento all'espressione dell'uomo mediante la parola detta, cioè comunicata, con suoni articolati emessi per il tramite di un organo particolare, la lingua. Per centinaia di migliaia di anni è stato questo l'unico modo di comunicare, di scambiarsi informazioni. A esso si sono via via affiancate altre modalità di espressione e comunicazione che, a rigore, non potrebbero essere considerate un linguaggio, perché ottenute con l'ausilio di tecnologie che in misura crescente hanno condizionato l'espressione verbale: dalla scrittura, cui ha fatto seguito la comunicazione scritta a stampa, fino a quelli che propriamente sono stati indicati come mezzi di comunicazione sociale o mass-media, cioè il giornale, il cinema, la radio e la televisione. Da queste tecnologie, incredibilmente potenziate e trasformate dall'"informatica" e dal suo strumento fondamentale, l'elaboratore elettronico, deriva la quasi totalità delle informazioni e dei "linguaggi" che, di fatto, accelerano e incrementano l'odierno processo di globalizzazione.

La parola “informatica” richiama evidentemente altri due termini: quello di “informazione” e, relativamente alle ultime tre sillabe, quello di “automazione”. Il rinvio non è casuale. In questo contesto, l’informazione è concepita non solo e semplicemente come elemento di conoscenza ma anche, e soprattutto, come fattore che produce variazioni in un sistema, che può essere artificiale ma anche naturale. In tal senso, l’impulso elettrico che transita tra le due parti di un circuito elettronico è un’informazione, così come lo sono le attività dei neuroni, cioè le cellule del nostro cervello. Essa costituisce il materiale che viene elaborato da macchine che operano automaticamente, cioè senza l’immediata assistenza dell’uomo; di qui la necessità di inserire l’aggettivo “automatico” a completamento della parola “informatica”. Lo strumento che governa questo processo si chiama *elaboratore elettronico*, sicché l’*informatica* è, potremmo dire, la scienza che studia il trattamento dell’informazione operato dall’elaboratore elettronico. Tuttavia, dal momento che essa condiziona in profondità la vita dell’individuo e della società, potremmo aggiungere che l’informatica si caratterizza anche come lo studio delle conseguenze provocate dalla tecnologia dell’elaborazione dell’informazione. In quanto disciplina, essa si è inserita autonomamente nel contesto degli studi scientifici solo dopo il 1930, grazie alle ricerche matematiche condotte in Gran Bretagna e negli Stati Uniti d’America, benché la sua denominazione, coniata in Francia nel 1966, abbia origini assai più recenti.

2. Il computer

Si tratta di un dispositivo elettronico in grado di ricevere e di eseguire delle sequenze di istruzioni, i cosiddetti programmi, svolgendo calcoli ed elaborando dati numerici o altre informazioni simboliche. Di qui l’originaria denominazione di elaboratore elettronico. Ciascuno può, per proprio conto, constatare che elaboratori diversi, sia per le funzioni svolte sia per le loro dimensioni fisiche, svolgono quotidianamente una serie di compiti fondamentali nella ricerca scientifica pura e applicata, nell’ambito amministrativo e finanziario di enti pubblici e privati, nell’industria e nei processi produttivi e persino nello svolgimento della didattica.

I dispositivi di elaborazione elettronica possono essere opportunamente distinti in due grandi categorie, in base alla forma in cui si presentano le informazioni sottoposte a elaborazione o memorizzazione: elaboratori analogici ed elaboratori digitali.

Gli *elaboratori analogici* sono dispositivi elettronici pensati per trattare informazioni di ingresso costituite da segnali continui che rappresentano i valori di grandezze continue, quali le grandezze fisiche pressione, temperatura ecc. Il loro utilizzo è particolarmente indicato tanto nelle prove di simulazione di fenomeni fisici, quanto nel controllo di determinati processi industriali.

Gli *elaboratori digitali* sono i più comuni; operano con informazioni o dati di ingresso espressi sotto forma di combinazioni numeriche o simboliche discrete, ossia discontinue. Di qui l'uso del termine "digitale" che deriva dalla parola inglese *digit*, cioè cifra. Qualunque informazione introdotta in un elaboratore di questa categoria per mezzo di un dispositivo di ingresso, come una tastiera, numeri, lettere, simboli, devono prima essere espressi secondo il codice binario. Gli elementi costitutivi di questo codice sono 0 e 1, detti *bit* dalla contrazione dell'espressione inglese *binary digit*, cioè cifra binaria. L'informazione viene poi trasformata in impulsi elettrici, tali da poter risultare suscettibili di elaborazione. La rapidità di un elaboratore elettronico digitale dipende dalla frequenza di sincronizzazione e si misura in Megahertz, cioè milioni di cicli al secondo (MHz), o in Gigahertz, miliardi di cicli al secondo (GHz). Essa esprime, potremo dire, il numero di operazioni elementari trattate nell'unità di tempo. La loro potenza e velocità di calcolo dipendono anche dalla quantità di informazione o dati trattati in ogni ciclo. È chiaro che se un elaboratore di questa categoria leggesse a ogni ciclo lo stato di un unico circuito elementare potrebbe scegliere solo tra due alternative: lo stato On rappresenterebbe una operazione o un numero; lo stato Off rappresenterebbe un'altra operazione o un numero. I nostri elaboratori sono invece in grado di controllare, al contempo, più circuiti elementari che complessivamente codificano un'informazione.

I dati in forma analogica possono essere acquisiti da un elaboratore digitale con l'ausilio di un dispositivo denominato convertitore analogico-digitale, cui corrisponde un convertitore digitale-analogico per l'operazione inversa. Esistono infine sistemi ibridi di elaborazione, cioè sistemi che contengono elementi appartenenti a entrambe le categorie, analogica e digitale.

Dal punto di vista delle prestazioni e dei costi sul mercato, gli elaboratori digitali possono essere distinti nelle seguenti categorie:

- microelaboratori, dispositivi relativamente accessibili sul piano economico, di dimensioni sempre più ridotte ma con sempre più accre-

- sciute prestazioni, tanto che attualmente la loro frequenza risulta superiore a 1 GHz. Il loro uso è normalmente rivolto alle esigenze personali del singolo, da cui la denominazione personal computer;
- *workstation*, elaboratori con prestazioni grafiche e matematiche piuttosto avanzate impiegate nel lavoro di ufficio; queste postazioni di lavoro sono spesso collegate a rete locale o anche estesa;
 - *minicomputer*, elaboratori assai costosi e di dimensioni rilevanti, in genere preferiti per la gestione di aziende, laboratori ecc.;
 - *mainframe computer*, elaboratori molto costosi e tali da soddisfare le esigenze di servizio di complesse realtà commerciali, amministrative e scientifiche; a questa categoria appartengono i cosiddetti supercalcolatori, capaci di eseguire calcoli estremamente sofisticati a velocità vertiginose (miliardi di cicli al secondo), come quelli deputati alle analisi meteorologiche.

Chi per la prima volta accede all'universo che l'elaboratore elettronico dischiude davanti ai suoi occhi, entra in contatto con due termini fondamentali: le chiavi per poter accedere e iniziare il viaggio in questa nuova realtà. Le parole in questione sono *hardware* e *software*.

Con il termine *hardware* ci si riferisce alle componenti elettroniche e meccaniche di un elaboratore, la sua struttura fisica che, nel caso di un dispositivo digitale, prevede almeno cinque elementi o componenti di base

a) L'unità centrale di elaborazione

L'unità centrale di elaborazione (*Central Processing Unit*), il cui acronimo è Cpu, che svolge le operazioni aritmetiche e logiche, detta il tempo e controlla le operazioni degli altri elementi del sistema. Fino al 1971 la Cpu era costituita da uno o più circuiti integrati collegati tra loro; l'introduzione del microprocessore, il cosiddetto *chip*, una piastrina di silicio di dimensioni ridottissime che contiene anche circuiti ausiliari e memoria, ha permesso di concentrare in un solo elemento tutte queste funzioni, ridimensionando la struttura fisica dell'elaboratore.

Generalmente un microprocessore presenta quattro sezioni:

- un'unità aritmetico-logica dove ha sede la capacità di calcolo;
- alcuni spazi di memoria temporanea relativi ai dati e agli indirizzi delle istruzioni – detti *registri* –, ai risultati delle operazioni e ai luoghi in cui vengono archiviate tutte queste informazioni;

- una sezione di controllo che assolve tre funzioni: regola e dà il tempo alle operazioni dell'intero sistema; legge le combinazioni su un registro con l'ausilio di un decodificatore, le riconosce e dispone i meccanismi necessari per la loro esecuzione; determina infine l'ordine in cui i dispositivi del sistema possono utilizzare le risorse della Cpu e regola il tempo che quest'ultima deve destinare a ogni operazione;
- una rete di linee di comunicazione, chiamata *bus*, che collega tra loro le parti del processore e i terminali esterni. Un processore prevede tre diversi bus: uno di controllo, con linee che identificano i segnali esterni e linee che trasportano all'esterno i segnali di controllo emessi dalla Cpu; un secondo bus, degli indirizzi, che trasporta i segnali per la selezione delle locazioni di memoria; infine un terzo bus di dati, di natura bidirezionale: conduce al microprocessore i dati in memoria e porta alla memoria i nuovi dati.

b) I dispositivi di ingresso

I dispositivi di ingresso permettono di inviare alla Cpu dati, comandi e programmi. Essi sono:

- la tastiera, che trasforma ogni carattere o simbolo indicato in una combinazione di bit che l'elaboratore può leggere;
- la tavoletta grafica, il joystick (un dispositivo di puntamento in uso per i giochi) e il mouse, che controllano i movimenti del cursore sul video;
- la penna ottica, per puntare gli oggetti visualizzati;
- lo scanner ottico, che legge le pagine di un documento, ne traduce i caratteri e le immagini in sequenze di bit elaborabili e memorizzabili;
- il riconoscitore di voce, che traduce le parole dell'operatore in segnali digitali.

c) I dispositivi di memoria

Il plurale è d'obbligo, perché occorre distinguere sul piano generale due tipi di memoria attraverso i quali i sistemi di calcolo possono immagazzinare i dati; distinzione cui segue, sul piano specifico, un'ulteriore divisione. Dal punto di vista generale avremo:

- la memoria di lavoro, che è interna;
- la memoria detta di massa, che è esterna.

La memoria di lavoro distingue al proprio interno due diverse memorie. La prima memoria è costituita dalla Ram, acronimo che sta per *Random Access Memory*, cioè memoria ad accesso casuale, che rappresenta la memoria temporanea impiegata per contenere i programmi, il lavoro in esecuzione e vari tipi di informazioni per il controllo del funzionamento interno. Le unità a disco consentono di conservare permanentemente le informazioni. La seconda memoria è denominata Rom, acronimo di *Read-Only Memory*, cioè memoria di sola lettura. Questa memoria rappresenta un supporto permanente, non cancellabile, su cui vengono registrate informazioni particolarmente importanti, quali le istruzioni di avvio e le procedure di ingresso e uscita. Tanto la Ram quanto la Rom sono collegate all'unità centrale di elaborazione.

La memoria di massa, conserva i dati con diversi supporti: nastri magnetici, floppy disk, hard disk. I sistemi di calcolo di grandi dimensioni utilizzano generalmente banchi di memorie su nastro magnetico.

d) I dispositivi di uscita

I dispositivi di uscita rendono accessibile all'operatore, attraverso la loro visione, risultati dei calcoli e delle operazioni eseguite dall'elaboratore elettronico. Il dispositivo più comune è il video; altri sono la stampante e il modem; quest'ultimo consente al computer di trasmettere informazioni attraverso la linea telefonica standard, convertendo il segnale digitale in segnale analogico e viceversa.

Con il termine *software* si fa riferimento all'insieme dei programmi e dei linguaggi di programmazione che rendono operativo l'hardware di un elaboratore elettronico. Per evitare facili confusioni è opportuno distinguere preventivamente:

- il software di base;
- il software applicativo.

Il software di base comprende il sistema operativo e i programmi più vicini all'hardware. I sistemi operativi sono registrati nella Rom e hanno lo scopo di coordinare e adattare i dati che affluiscono da sorgenti diverse, cioè circuiti integrati in grado di elaborare e operare contemporaneamente con l'unità centrale. Si può dire che un sistema operativo è un programma di controllo che, collocato in

una memoria interna permanente, interpreta i comandi dell'operatore che richiedono specifici servizi, quali la stampa o la copiatura di un file.

Il software applicativo comprende programmi e linguaggi utilizzati per funzioni di alto livello, quali l'archiviazione di dati.

Per programma, deve semplicemente intendersi una sequenza di istruzioni che indicano alla macchina le operazioni che deve svolgere per elaborare delle informazioni. Come tali, i programmi possono essere di due tipi:

- vincolati all'elaboratore, come nel caso dei computer che assolvono a un'unica funzione;
- indipendenti dalla struttura dell'elaboratore.

Un elaboratore che svolge applicazioni generali, contiene alcuni programmi imm modificabili, locati nella Rom o nella Cpu; tuttavia, per svolgere le funzioni applicative, ad esempio per realizzare un'immagine grafica, l'elaboratore dipende da programmi esterni.

Si è detto in precedenza che ogni elaboratore riceve i comandi o le istruzioni attraverso un linguaggio di programmazione, tale che a ogni comando sia assicurata una determinata combinazione di cifre binarie. Il linguaggio di macchina è costituito da combinazioni di stati binari comprensibili dall'elaboratore: il programmatore di linguaggio macchina non fa altro che inserire i dati, ogni dato, in forma binaria; un'operazione che ottimizza certamente i programmi, ma che richiede tempi assai lunghi. Questo inconveniente viene attualmente superato con l'apporto di linguaggi particolari, di livello superiore, che usano termini della lingua inglese per esprimere singoli comandi che racchiudono sequenze molto lunghe di istruzioni in linguaggio macchina. Un programma deputato alla traduzione converte a sua volta le istruzioni in linguaggio macchina.

3. Che cos'è Internet

Il termine, ormai di uso quotidiano, sta per rete globale aperta di computer, composta da più reti locali, che consente la comunicazione diretta tra elaboratori elettronici diversi dislocati in tutto il mondo. Le reti Internet utilizzano tutti i mezzi di trasmissione elettronica attualmente disponibili, dalle fibre ottiche e le linee in rame per telefoni, ai canali radio o microonde e le reti satel-

litari per le telecomunicazioni. Per inserirsi nella ragnatela globale è sufficiente connettere il proprio elaboratore alla rete attraverso le linee telefoniche con un modem, oppure con il telefono cellulare.

Ciò che rende Internet particolarmente invitante e attraente non sta solo nel fatto che singoli computer o gruppi di elaboratori siano in grado di dialogare e di scambiarsi informazioni senza che la distanza geografica o temporale sia di ostacolo, ma soprattutto che lo scambio di informazioni è possibile attraverso un'unica lingua. Ed è proprio in virtù di questa possibilità che sono state create forme di comunicazione estremamente pratiche, semplici ed efficaci, come il *world wide web*, la posta elettronica, la trasmissione di immagini e di filmati ecc. Quando si parla di Internet ci si riferisce perciò sempre alla rete globale; la precisazione è doverosa perché esistono reti limitate ad accesso controllato, denominate *Intranet*, gestite esclusivamente e interamente da società e aziende.

Internet nasce come una evoluzione di un progetto perseguito verso la fine degli anni Settanta del secolo scorso negli Usa dall'*Advanced Research Project Agency* (Arpa). Il progetto, denominato *Arpanet*, rispondeva a un'esigenza strategica: quella di ristrutturare la rete informatica dell'esercito statunitense che, costruita secondo un modello gerarchico attorno a un elaboratore centrale, era evidentemente esposta al grave rischio di essere resa inefficace una volta individuato e attaccato il cuore del sistema. Si pensò così di ridisegnare e ripensare l'intero apparato in modo che ogni elaboratore, benché responsabile dell'invio di informazioni agli altri computer, non dovesse necessariamente far riferimento, diretto o indiretto, all'elaboratore centrale. In caso di attacco e distruzione di uno o più terminali centrali, la rete di collegamento sarebbe rimasta efficiente, con il vantaggio ulteriore di semplificare l'accesso al sistema di nuove unità di elaborazione e, di conseguenza, la crescita della rete. Ogni elaboratore sarebbe venuto a conoscenza degli altri dispositivi a lui identici in virtù dell'accesso a una serie di indirizzi non più centralizzati, ma disposti in innumerevoli nodi periferici.

Il prototipo di Internet risale al 1982, quando furono collegati tra loro duecento elaboratori elettronici; l'anno seguente, il progetto fu fatto proprio dall'esercito Usa come supporto al proprio sistema primario di comunicazioni, collegando tutte le sue basi sparse sul pianeta. Tre anni più tardi, attraverso concessioni a enti e istituzioni pubbliche e di ricerca, le connessioni al sistema erano 28.000. In

seguito alla decisione dell'esercito statunitense di separarsi dalla rete per gestire autonomamente la creazione di un apparato simile a quello sperimentato con successo, da gestire in termini esclusivi, apparato che assumerà il nome di *MilNet*, la rete Internet si è ulteriormente estesa, aggregando anche i primi servizi commerciali. Ad oggi, non è possibile indicare con precisione il numero delle connessioni in rete.

L'enorme sviluppo della rete, compreso il fatto che il sistema di connessione di base non corre più solo sui cavi telefonici, ma si è adattato ai telefoni cellulari, alle trasmissioni via satellite e alla televisione interattiva, non ha cambiato la natura di Internet, che resta una rete unica, globale, aperta e non gerarchizzata. Gran parte delle informazioni e dei servizi in rete è del resto offerto gratuitamente dai gestori, per due buoni motivi: in ragione della divulgazione di informazioni di interesse generale, considerate importanti per la collettività; per motivi di ordine pubblicitario, dal momento che, oltre all'informazione, viene presentato uno spazio a pagamento. I costi relativi al collegamento telefonico alla rete sono in genere vicini a quelli di una semplice chiamata e, d'altra parte, di ciò in fin dei conti si tratta giacché si utilizza una linea fornita da uno dei tanti operatori di telefonia presenti sul mercato. Il servizio vero e proprio di collegamento è in genere fornito dallo stesso operatore.

Tra i mezzi di base offerti dalla rete globale, ce ne sono due che meritano una trattazione specifica.

Il primo di questi mezzi è denominato *world wide web* (www). Dal punto di vista tecnico, www non è altro che un sistema di computer collegati continuamente con la rete Internet capaci di offrire all'utente documenti redatti con un formato particolare chiamato *html*; questi documenti contengono dei collegamenti attivi verso altri tipi di documento o file, ai quali si può agevolmente accedere cliccando su uno dei diversi link creati appositamente dagli autori dei documenti. Il termine *link* indica proprio il punto specifico dal quale l'utente può muoversi verso un altro punto del testo in esame. Ogni pagina www è poi organizzata in ciò che ormai comunemente viene chiamato *sito Internet*, ossia una collezione di documenti o pagine di servizio che fanno capo a un unico indirizzo www. Per questo motivo, ogni volta che sentiamo dire www.qualcosa, pensiamo inevitabilmente a Internet. A ogni indirizzo corrisponde un servizio presente in un punto della rete di cui non si conosce l'ubicazione, ma facilmente raggiungibile digitandolo in uno specifico programma.

Naturalmente, per utilizzare il servizio *www* occorre essere collegati in rete e avere a disposizione un programma di navigazione *wes*, detto *browser*. Si tratta di programmi che consentono all'elaboratore di visualizzare *documenti ipertestuali*, cioè documenti che oltre al testo contengono anche elementi grafici, fotografie, suoni e animazioni. Le funzionalità di un *browser* comprendono il passaggio rapido da un sito a un altro, l'uso di un motore di ricerca per rintracciare informazioni precise sulla rete, la stampa dei documenti. Questi programmi sono interamente gratuiti, dal momento che è possibile scaricarli direttamente dalla rete.

Il secondo mezzo di base su cui merita soffermare l'attenzione è denominato *electronic mail* (e-mail): la posta elettronica. Non è affatto casuale che la posta elettronica sia la risorsa più largamente utilizzata di Internet; consente infatti a chiunque di inviare comodamente messaggi scritti, documenti e immagini risparmiando tempo e denaro rispetto al servizio di posta ordinario. Tutto ciò che serve per inviare e ricevere messaggi è l'accesso a Internet e una casella personale di posta elettronica. Il funzionamento del servizio è semplice. A ogni indirizzo e-mail fa capo una specifica casella postale ospitata dal computer del servizio on-line al quale si è affidata la casella. Quest'ultima è sostanzialmente uno spazio vuoto messo a disposizione su un computer centrale, al quale vengono di volta in volta spediti i messaggi, in attesa della loro lettura. Il computer riceve per conto dell'utente i messaggi in arrivo quando lo stesso non è connesso, e lo avverte della posta ricevuta una volta che l'interessato decide di collegarsi alla rete. L'accesso ai messaggi è consentito al solo utente o a chi ne conosce il nome e la chiave di accesso (*password*) assegnata dal sistema per poter leggere la nota.

Ogni casella è univocamente individuata da un indirizzo che ha la seguente forma:

Nomedell'utente@nomedel servizio.it

La parte che precede il simbolo @, che significa "presso" e si legge *at*, è appunto il nome dell'utente; la parte che segue il simbolo è il nome del computer che ospita la casella e, come tale, non può essere modificato. L'iscrizione a un servizio pubblico gratuito implica la libera scelta del nome da parte dell'utente, che perciò potrà utilizzare il proprio nome anagrafico o un qualsiasi pseudonimo. Ciò che più conta è

che il nome non sia già stato scelto o comunque che non sia motivo di offesa o danno per altri utenti.

Vi sono diversi modi di fruire della posta elettronica; i più diffusi sono le *web mail*, consultabili esclusivamente *on-line*, una volta connessi con Internet, e le *pop mail*, che offrono la possibilità di scaricare i messaggi sul proprio computer e di consultarli senza restare collegati alla rete. La consultazione web ha il vantaggio di poter far accedere l'utente al proprio indirizzo di posta da qualsiasi computer connesso a Internet utilizzando un normale browser, senza dover ricorrere a uno specifico software di posta elettronica.

Uno stesso messaggio e-mail può essere inviato contemporaneamente a più persone; assieme a un messaggio, come già anticipato, è possibile trasmettere via Internet anche degli allegati che possono essere programmi, testi, immagini ecc.

4. L'Intelligenza Artificiale

I progressi compiuti dalla tecnologia informatica e i successi che derivano dalla sua applicazione sono un fatto incontestabile. Eppure, il concetto di elaboratore elettronico, la definizione del suo ruolo in quanto dispositivo di automazione, erano e restano gli stessi. Il computer è una macchina capace di eseguire qualsiasi programma di elaborazione gli venga fornito offrendo così, per ogni possibile insieme di dati, il corrispondente risultato. Il suo ruolo resta quello di consentire l'automazione nel dominio dell'elaborazione dei simboli sostituendo l'operare dell'uomo. Tutto ciò, naturalmente, a una condizione: che l'uomo sia capace di descrivere dettagliatamente, in ogni singolo passaggio, il compito che la macchina è chiamata a svolgere.

Su questo punto è bene essere estremamente chiari. Questa condizione irrinunciabile risponde, del resto, a una particolare, ma non per questo unica né esclusiva modalità con la quale, come sembra, ci disponiamo allorché intendiamo risolvere dei problemi. Si tratta di un approccio che consiste essenzialmente nel riferimento indiretto alle conoscenze specifiche in nostro possesso nei confronti del compito che ci viene proposto. Quindi, per prima cosa, costruiremo un modello del problema da risolvere per poi trovare un metodo di soluzione specifico e particolare dello stesso, ciò che in gergo viene indicato come *l'algoritmo*. L'esecuzione delle procedure indicate dall'algoritmo ci conduce infine alla risoluzione del compito che ci era-

vamo prefissati, ottenendo così un doppio risultato: da un lato, la soluzione del problema, dall'altro, la possibilità di utilizzare permanentemente questa soluzione, ovvero ogni volta che si ripresenterà un identico problema non avremo bisogno di elaborare un nuovo algoritmo. Potremo insomma affermare che i compiti che sono suscettibili di automazione sono tutti quelli mediante i quali si è capaci di delineare un preciso modello formale e di sviluppare adeguati metodi risolutivi descrivibili con estrema precisione e chiarezza.

L'utilità che deriva dalla elaborazione dei dati è evidente: minori costi, maggiore velocità e affidabilità. Tuttavia, c'è un'altra modalità, anch'essa propria dell'uomo, attraverso la quale giungiamo alla risoluzione dei problemi: quella in cui vengono utilizzate tutte le conoscenze disponibili che, attraverso la mediazione di ragionamenti di validità generale ci conducono, nella loro applicazione, alla soluzione desiderata; una soluzione che, tuttavia, è raggiunta senza produrre alcuna specifica e dettagliata procedura, tale da poter valere in ogni situazione simile a quella affrontata con successo.

Un semplice esempio ci aiuterà a cogliere con chiarezza la diversità dei due approcci che abbiamo descritto. Poniamo di essere stati incaricati di svelare l'identità di un libro a stampa molto antico, del quale sono andati perduti, perché fisicamente deteriorati o mutilati, i dati fondamentali che lo contraddistinguono. Il nostro compito, difficile ma non impossibile, consisterà dunque nel ricostruire i caratteri fondamentali della fisionomia del libro che ci è stato sottoposto; per assolverlo dovremo ricorrere a un ampio ventaglio di conoscenze, quali la storia del libro antico, quella della carta e delle tecniche della sua produzione, la conoscenza delle tecniche tipografiche e i loro esponenti ecc.; soprattutto, dovremo far riferimento a possibili e analoghe esperienze che possiamo aver avuto in passato o far riferimento alle esperienze altrui. Una volta raggiunta la nostra soluzione al problema, non potremo godere del vantaggio di poterla applicare automaticamente a qualsiasi caso analogo o simile che ci si potrà presentare in futuro: il risultato ottenuto è limitato a quel solo caso, non è esportabile, sicché, eventualmente, dovremo iniziare tutto da capo, ma facendo tesoro dell'esperienza acquisita.

Orbene, poste le cose in questi termini dobbiamo chiederci: siamo in grado di costruire una macchina, un elaboratore, capace di operare secondo la modalità appena espressa ed esemplificata, ma senza la necessità di disporre di uno specifico programma per ogni

nuovo problema posto? Ancor più chiaramente: possiamo far fare all'elaboratore elettronico delle attività che, se fossero eseguite dall'uomo, sarebbero considerate intelligenti? Da questo interrogativo, espresso ormai mezzo secolo fa nel corso di un seminario estivo presso il Dartmouth College di Hannover, nel New Hampshire (Usa), ha origine la sfida che, in quella sede, assunse il nome di *Artificial Intelligence* (A.I.), una sfida che siamo ora in grado di poter necessariamente e opportunamente distinguere dalle tecniche di elaborazione cui siamo abituati.

La necessità della distinzione, che è bene aver sempre presente, sta nel fatto che, nel caso dell'elaborazione elettronica tradizionale, l'uomo che la progetta deve conoscere tanto la metodologia di risoluzione del problema quanto le caratteristiche di funzionamento della macchina che si ha in mente di utilizzare, perché è su queste basi che si può costruire l'algoritmo e il programma che produrranno il risultato; nel caso invece di ciò che viene indicato come tecniche di Intelligenza Artificiale, l'uomo non dovrebbe far altro che descrivere alla macchina il problema da risolvere, tutt'al più allegando una serie di esempi che includano descrizioni di situazioni analoghe precedentemente risolte, lasciando alla macchina stessa il compito di individuare la procedura corretta e adeguata al conseguimento del risultato cercato. Il divario tra i due differenti ambiti di elaborazione si fa ancor più netto qualora si consideri l'eventuale capacità dei due sistemi di poter offrire spiegazioni sul modo in cui si è giunti al risultato: il che, evidentemente, implica una valutazione delle scelte operate.

Siamo ora in condizione di illustrare i settori in cui trovano applicazione le tecniche di A.I., indicarne gli sviluppi e le prospettive. I contesti di ricerca propri dell'Intelligenza Artificiale sono di natura teorica e pratica. Sul piano teorico, di base, la possibilità di dotare una macchina delle caratteristiche che, in qualche modo, attribuiamo all'intelligenza umana, prende corpo anzitutto in indagini e ricerche tese a chiarire i termini attraverso i quali una macchina può imparare scambiando dati e messaggi con l'esterno. In questa prospettiva, diviene prioritaria la capacità di riconoscere il linguaggio naturale, cui si collega il problema della visione bidimensionale o tridimensionale, attraverso dei sensori, delle informazioni provenienti dall'esterno. A questi studi si accompagnano, in secondo luogo, le ricerche che riguardano l'acquisizione della capacità di organizzare la conoscenza e, con esse, quella di rielaborare, ossia indi-

care, nuove strategie per la risoluzione di nuovi problemi, in una parola: ragionare. I risultati conseguiti sul piano teorico di base sono particolarmente rilevanti, con apprezzabili ricadute di ordine pratico, benché limitate ad aspetti particolari.

Sul piano applicativo, i settori che vedono coinvolte tecniche riferibili all'Intelligenza Artificiale sono quello dei cosiddetti "sistemi esperti" e quello della robotica.

I *sistemi esperti* trovano applicazione in diversi ambiti, dalla chimica alla medicina, dall'elettronica alla geologia e alla difesa. Si tratta di programmi complessi che permettono all'elaboratore di utilizzare una base costituita da conoscenze specialistiche per risolvere quesiti che richiedono particolari competenze specifiche, proprio come accade quando interpelliamo un esperto per ottenere una valutazione circoscritta a un determinato ordine di problemi.

Un sistema esperto dispone di tre componenti principali:

- l'interfaccia tra l'elaboratore e l'operatore;
- la base delle conoscenze;
- la struttura di controllo.

L'*interfaccia*, cioè il linguaggio di programma, rende possibile l'interazione con il dispositivo sia nel senso di porgli dei quesiti sia di codificarne le risposte. È chiaro che più semplice è il linguaggio di programma, più facile ed efficiente sarà il colloquio.

La *base delle conoscenze* è, semplicemente, l'insieme delle conoscenze specifiche di un richiesto e dato particolare settore, trasferite nella memoria della macchina e ordinate in modo tale da essere elaborate; aspetto, quest'ultimo, particolarmente delicato e difficoltoso perché tali conoscenze devono poter essere opportunamente disposte in rapporto alle relazioni e alle regole di implicazione.

La *struttura di controllo* del processo ha il compito di guidare il sistema nella scelta e nella coordinazione delle varie conoscenze, in modo da conseguire il risultato prefissato.

La tecnologia dell'automazione, che sviluppa e produce dispositivi in grado di compiere determinate operazioni senza l'immediato intervento umano, si è ulteriormente sviluppata negli ultimi vent'anni attraverso la programmazione elettronica. Se gli automatismi tradizionali obbedivano a programmi definiti e incorporati nella configurazione dei dispositivi, le nuove apparecchiature dispongono di

programmi capaci di autoregolazione. In altri termini, con l'apporto di particolari sensori, le attuali macchine automatiche sono capaci di misurare lo scarto tra il comportamento standard e quello effettivamente realizzato, e di intervenire con correzioni e aggiustamenti, al fine di mantenere il processo entro gli ambiti desiderati e configurati. Ad alcune di queste macchine è stato assegnato il nome di *robot* – termine che deriva dalla lingua ceca, e che significa lavoro – e una struttura e fisionomia umanoide per evidenziare la vicinanza delle loro prestazioni a quelle proprie dell'uomo. Ora, poiché migliorando le capacità degli elaboratori, dei sensori e degli apparati di esecuzione risultano migliorate anche le prestazioni dei robot, gli studi dell'Intelligenza Artificiale sono orientati a ricerche e sperimentazioni sugli apparati di esecuzione, ma, soprattutto, sui sensori, deputati a individuare dimensioni e figure degli oggetti alla loro portata.

In una prospettiva non molto distante nel tempo, le tecniche di Intelligenza Artificiale potrebbero fornire due importanti tecnologie che prevedono un raggio di applicazione estremamente vasto:

- le reti neurali;
- gli algoritmi genetici.

Come ben sappiamo, la caratteristica fondamentale di un elaboratore tradizionale è la sequenzialità: il programma esegue una sola istruzione alla volta. Ciò consente, è vero, l'elaborazione di una grande massa di informazioni, ma implica anche l'inconveniente di dover accettare delle funzioni inattive. Il cervello umano, al contrario, opera parallelamente, e può essere considerato come una sterminata rete costituita da cellule, i *neuroni*, tutti collegati tra loro. Su questa base, si è pensato di considerare l'elaborazione delle informazioni come l'interazione di numerose entità che simulano i nostri neuroni e, come questi, si connettono mediante una molteplicità di fibre. Ciascuna di queste entità, denominate unità, riceve segnali dalla connessione che la collega ad altre unità, combina i segnali, che possono essere inibitori o attivatori, ed emette a sua volta un segnale che si propaga quando la sua stimolazione globale supera una certa soglia. Considerate singolarmente, le nostre unità sono poco "intelligenti", ma connesse tra loro danno luogo a un'unità "intelligente" con capacità di apprendimento dovuta al fatto che le connessioni tra le unità tendono a

evolvere nel tempo modificando i rispettivi pesi in base alla conoscenza acquisita.

Rispetto all'informatica tradizionale, le reti neurali presentano caratteristiche molto rilevanti:

- non necessitano di programmazione perché imparano dagli esempi;
- sono dotate di una memoria che risiede nelle connessioni;
- sono strutture che offrono risposte flessibili.

Gli algoritmi genetici sono stati ideati per riprodurre alcuni processi propri dell'evoluzione naturale degli organismi viventi e per realizzare programmi basati su elaboratori capaci di risolvere problemi molto complessi attraverso un processo evolutivo. I presupposti della teoria sono i seguenti:

- come in natura, gli algoritmi genetici generano una popolazione cromosomica sempre migliore, attraverso la manipolazione degli agenti della popolazione precedente;
- come in natura, gli algoritmi ignorano le caratteristiche del problema da risolvere;
- l'unica valutazione che può giungere agli algoritmi è inerente al progresso cromosomico della popolazione, valutazione che determina, da parte degli stessi algoritmi, la selezione dei cromosomi e il loro progressivo miglioramento in relazione alla loro interazione con l'ambiente.

Gli algoritmi genetici si avvalgono così di un procedimento basato su tre operatori: la riproduzione, cioè la selezione degli individui; il cambiamento delle informazioni genetiche; la mutazione ovvero la possibilità di variare una piccola parte delle informazioni genetiche degli individui.

INFORMAZIONE

1. Che cos'è l'informatica

L'intera esistenza umana, tanto dal punto di vista biologico e individuale, quanto da quello sociale, di relazione con i nostri simili, può ben essere caratterizzata con l'ausilio del termine "informazione". Infatti, se da un lato le nostre cellule si trasmettono delle informazioni, comunicano tra loro e con l'esterno, dall'altro lato, per il fatto di essere animali sociali, possiamo distinguere almeno tre forme di comunicazione e, dunque, di relazione. Anzitutto, la relazione tra i sessi, che dà luogo alla parentela; poi la relazione che ha per oggetto i beni, siano essi materiali o meno, che genera l'economia; infine, la relazione dei nostri contenuti di coscienza, ossia ciò che comprendiamo, che sentiamo e vogliamo, che origina il linguaggio: forma quest'ultima alla quale, come è agevole capire, le due precedenti si ricollegano e, grazie alla quale, si realizzano pienamente nella nostra umanità.

In senso stretto, il termine linguaggio dovrebbe dunque esser usato facendo riferimento all'espressione dell'uomo mediante la parola detta, cioè comunicata, con suoni articolati emessi per il tramite di un organo particolare, la lingua. Per centinaia di migliaia di anni è stato questo l'unico modo di comunicare, di scambiarsi informazioni. A esso si sono via via affiancate altre modalità di espressione e comunicazione che, a rigore, non potrebbero essere considerate un linguaggio, perché ottenute con l'ausilio di tecnologie che in misura crescente hanno condizionato l'espressione verbale: dalla scrittura, cui ha fatto seguito la comunicazione scritta a stampa, fino a quelli che propriamente sono stati indicati come mezzi di comunicazione sociale o mass-media, cioè il giornale, il cinema, la radio e la televisione. Da queste tecnologie, incredibilmente potenziate e trasformate dall'"informatica" e dal suo strumento fondamentale, l'elaboratore elettronico, deriva la quasi totalità delle informazioni e dei "linguaggi" che, di fatto, accelerano e incrementano l'odierno processo di globalizzazione.

La parola “informatica” richiama evidentemente altri due termini: quello di “informazione” e, relativamente alle ultime tre sillabe, quello di “automazione”. Il rinvio non è casuale. In questo contesto, l’informazione è concepita non solo e semplicemente come elemento di conoscenza ma anche, e soprattutto, come fattore che produce variazioni in un sistema, che può essere artificiale ma anche naturale. In tal senso, l’impulso elettrico che transita tra le due parti di un circuito elettronico è un’informazione, così come lo sono le attività dei neuroni, cioè le cellule del nostro cervello. Essa costituisce il materiale che viene elaborato da macchine che operano automaticamente, cioè senza l’immediata assistenza dell’uomo; di qui la necessità di inserire l’aggettivo “automatico” a completamento della parola “informatica”. Lo strumento che governa questo processo si chiama *elaboratore elettronico*, sicché l’*informatica* è, potremmo dire, la scienza che studia il trattamento dell’informazione operato dall’elaboratore elettronico. Tuttavia, dal momento che essa condiziona in profondità la vita dell’individuo e della società, potremmo aggiungere che l’informatica si caratterizza anche come lo studio delle conseguenze provocate dalla tecnologia dell’elaborazione dell’informazione. In quanto disciplina, essa si è inserita autonomamente nel contesto degli studi scientifici solo dopo il 1930, grazie alle ricerche matematiche condotte in Gran Bretagna e negli Stati Uniti d’America, benché la sua denominazione, coniata in Francia nel 1966, abbia origini assai più recenti.

2. Il computer

Si tratta di un dispositivo elettronico in grado di ricevere e di eseguire delle sequenze di istruzioni, i cosiddetti programmi, svolgendo calcoli ed elaborando dati numerici o altre informazioni simboliche. Di qui l’originaria denominazione di elaboratore elettronico. Ciascuno può, per proprio conto, constatare che elaboratori diversi, sia per le funzioni svolte sia per le loro dimensioni fisiche, svolgono quotidianamente una serie di compiti fondamentali nella ricerca scientifica pura e applicata, nell’ambito amministrativo e finanziario di enti pubblici e privati, nell’industria e nei processi produttivi e persino nello svolgimento della didattica.

I dispositivi di elaborazione elettronica possono essere opportunamente distinti in due grandi categorie, in base alla forma in cui si presentano le informazioni sottoposte a elaborazione o memorizzazione: elaboratori analogici ed elaboratori digitali.

La parola “informatica” richiama evidentemente altri due termini: quello di “informazione” e, relativamente alle ultime tre sillabe, quello di “automazione”. Il rinvio non è casuale. In questo contesto, l’informazione è concepita non solo e semplicemente come elemento di conoscenza ma anche, e soprattutto, come fattore che produce variazioni in un sistema, che può essere artificiale ma anche naturale. In tal senso, l’impulso elettrico che transita tra le due parti di un circuito elettronico è un’informazione, così come lo sono le attività dei neuroni, cioè le cellule del nostro cervello. Essa costituisce il materiale che viene elaborato da macchine che operano automaticamente, cioè senza l’immediata assistenza dell’uomo; di qui la necessità di inserire l’aggettivo “automatico” a completamento della parola “informatica”. Lo strumento che governa questo processo si chiama *elaboratore elettronico*, sicché l’*informatica* è, potremmo dire, la scienza che studia il trattamento dell’informazione operato dall’elaboratore elettronico. Tuttavia, dal momento che essa condiziona in profondità la vita dell’individuo e della società, potremmo aggiungere che l’informatica si caratterizza anche come lo studio delle conseguenze provocate dalla tecnologia dell’elaborazione dell’informazione. In quanto disciplina, essa si è inserita autonomamente nel contesto degli studi scientifici solo dopo il 1930, grazie alle ricerche matematiche condotte in Gran Bretagna e negli Stati Uniti d’America, benché la sua denominazione, coniata in Francia nel 1966, abbia origini assai più recenti.

2. Il computer

Si tratta di un dispositivo elettronico in grado di ricevere e di eseguire delle sequenze di istruzioni, i cosiddetti programmi, svolgendo calcoli ed elaborando dati numerici o altre informazioni simboliche. Di qui l’originaria denominazione di elaboratore elettronico. Ciascuno può, per proprio conto, constatare che elaboratori diversi, sia per le funzioni svolte sia per le loro dimensioni fisiche, svolgono quotidianamente una serie di compiti fondamentali nella ricerca scientifica pura e applicata, nell’ambito amministrativo e finanziario di enti pubblici e privati, nell’industria e nei processi produttivi e persino nello svolgimento della didattica.

I dispositivi di elaborazione elettronica possono essere opportunamente distinti in due grandi categorie, in base alla forma in cui si presentano le informazioni sottoposte a elaborazione o memorizzazione: elaboratori analogici ed elaboratori digitali.

Gli *elaboratori analogici* sono dispositivi elettronici pensati per trattare informazioni di ingresso costituite da segnali continui che rappresentano i valori di grandezze continue, quali le grandezze fisiche pressione, temperatura ecc. Il loro utilizzo è particolarmente indicato tanto nelle prove di simulazione di fenomeni fisici, quanto nel controllo di determinati processi industriali.

Gli *elaboratori digitali* sono i più comuni; operano con informazioni o dati di ingresso espressi sotto forma di combinazioni numeriche o simboliche discrete, ossia discontinue. Di qui l'uso del termine "digitale" che deriva dalla parola inglese *digit*, cioè cifra. Qualunque informazione introdotta in un elaboratore di questa categoria per mezzo di un dispositivo di ingresso, come una tastiera, numeri, lettere, simboli, devono prima essere espressi secondo il codice binario. Gli elementi costitutivi di questo codice sono 0 e 1, detti *bit* dalla contrazione dell'espressione inglese *binary digit*, cioè cifra binaria. L'informazione viene poi trasformata in impulsi elettrici, tali da poter risultare suscettibili di elaborazione. La rapidità di un elaboratore elettronico digitale dipende dalla frequenza di sincronizzazione e si misura in Megahertz, cioè milioni di cicli al secondo (MHz), o in Gigahertz, miliardi di cicli al secondo (GHz). Essa esprime, potremo dire, il numero di operazioni elementari trattate nell'unità di tempo. La loro potenza e velocità di calcolo dipendono anche dalla quantità di informazione o dati trattati in ogni ciclo. È chiaro che se un elaboratore di questa categoria leggesse a ogni ciclo lo stato di un unico circuito elementare potrebbe scegliere solo tra due alternative: lo stato On rappresenterebbe una operazione o un numero; lo stato Off rappresenterebbe un'altra operazione o un numero. I nostri elaboratori sono invece in grado di controllare, al contempo, più circuiti elementari che complessivamente codificano un'informazione.

I dati in forma analogica possono essere acquisiti da un elaboratore digitale con l'ausilio di un dispositivo denominato convertitore analogico-digitale, cui corrisponde un convertitore digitale-analogico per l'operazione inversa. Esistono infine sistemi ibridi di elaborazione, cioè sistemi che contengono elementi appartenenti a entrambe le categorie, analogica e digitale.

Dal punto di vista delle prestazioni e dei costi sul mercato, gli elaboratori digitali possono essere distinti nelle seguenti categorie:

- microelaboratori, dispositivi relativamente accessibili sul piano economico, di dimensioni sempre più ridotte ma con sempre più accre-

- sciute prestazioni, tanto che attualmente la loro frequenza risulta superiore a 1 GHz. Il loro uso è normalmente rivolto alle esigenze personali del singolo, da cui la denominazione personal computer;
- *workstation*, elaboratori con prestazioni grafiche e matematiche piuttosto avanzate impiegate nel lavoro di ufficio; queste postazioni di lavoro sono spesso collegate a rete locale o anche estesa;
 - *minicomputer*, elaboratori assai costosi e di dimensioni rilevanti, in genere preferiti per la gestione di aziende, laboratori ecc.;
 - *mainframe computer*, elaboratori molto costosi e tali da soddisfare le esigenze di servizio di complesse realtà commerciali, amministrative e scientifiche; a questa categoria appartengono i cosiddetti supercalcolatori, capaci di eseguire calcoli estremamente sofisticati a velocità vertiginose (miliardi di cicli al secondo), come quelli deputati alle analisi meteorologiche.

Chi per la prima volta accede all'universo che l'elaboratore elettronico dischiude davanti ai suoi occhi, entra in contatto con due termini fondamentali: le chiavi per poter accedere e iniziare il viaggio in questa nuova realtà. Le parole in questione sono *hardware* e *software*.

Con il termine *hardware* ci si riferisce alle componenti elettroniche e meccaniche di un elaboratore, la sua struttura fisica che, nel caso di un dispositivo digitale, prevede almeno cinque elementi o componenti di base

a) L'unità centrale di elaborazione

L'unità centrale di elaborazione (*Central Processing Unit*), il cui acronimo è Cpu, che svolge le operazioni aritmetiche e logiche, detta il tempo e controlla le operazioni degli altri elementi del sistema. Fino al 1971 la Cpu era costituita da uno o più circuiti integrati collegati tra loro; l'introduzione del microprocessore, il cosiddetto *chip*, una piastrina di silicio di dimensioni ridottissime che contiene anche circuiti ausiliari e memoria, ha permesso di concentrare in un solo elemento tutte queste funzioni, ridimensionando la struttura fisica dell'elaboratore.

Generalmente un microprocessore presenta quattro sezioni:

- un'unità aritmetico-logica dove ha sede la capacità di calcolo;
- alcuni spazi di memoria temporanea relativi ai dati e agli indirizzi delle istruzioni – detti *registri* –, ai risultati delle operazioni e ai luoghi in cui vengono archiviate tutte queste informazioni;

- una sezione di controllo che assolve tre funzioni: regola e dà il tempo alle operazioni dell'intero sistema; legge le combinazioni su un registro con l'ausilio di un decodificatore, le riconosce e dispone i meccanismi necessari per la loro esecuzione; determina infine l'ordine in cui i dispositivi del sistema possono utilizzare le risorse della Cpu e regola il tempo che quest'ultima deve destinare a ogni operazione;
- una rete di linee di comunicazione, chiamata *bus*, che collega tra loro le parti del processore e i terminali esterni. Un processore prevede tre diversi bus: uno di controllo, con linee che identificano i segnali esterni e linee che trasportano all'esterno i segnali di controllo emessi dalla Cpu; un secondo bus, degli indirizzi, che trasporta i segnali per la selezione delle locazioni di memoria; infine un terzo bus di dati, di natura bidirezionale: conduce al microprocessore i dati in memoria e porta alla memoria i nuovi dati.

b) I dispositivi di ingresso

I dispositivi di ingresso permettono di inviare alla Cpu dati, comandi e programmi. Essi sono:

- la tastiera, che trasforma ogni carattere o simbolo indicato in una combinazione di bit che l'elaboratore può leggere;
- la tavoletta grafica, il joystick (un dispositivo di puntamento in uso per i giochi) e il mouse, che controllano i movimenti del cursore sul video;
- la penna ottica, per puntare gli oggetti visualizzati;
- lo scanner ottico, che legge le pagine di un documento, ne traduce i caratteri e le immagini in sequenze di bit elaborabili e memorizzabili;
- il riconoscitore di voce, che traduce le parole dell'operatore in segnali digitali.

c) I dispositivi di memoria

Il plurale è d'obbligo, perché occorre distinguere sul piano generale due tipi di memoria attraverso i quali i sistemi di calcolo possono immagazzinare i dati; distinzione cui segue, sul piano specifico, un'ulteriore divisione. Dal punto di vista generale avremo:

- la memoria di lavoro, che è interna;
- la memoria detta di massa, che è esterna.

La memoria di lavoro distingue al proprio interno due diverse memorie. La prima memoria è costituita dalla Ram, acronimo che sta per *Random Access Memory*, cioè memoria ad accesso casuale, che rappresenta la memoria temporanea impiegata per contenere i programmi, il lavoro in esecuzione e vari tipi di informazioni per il controllo del funzionamento interno. Le unità a disco consentono di conservare permanentemente le informazioni. La seconda memoria è denominata Rom, acronimo di *Read-Only Memory*, cioè memoria di sola lettura. Questa memoria rappresenta un supporto permanente, non cancellabile, su cui vengono registrate informazioni particolarmente importanti, quali le istruzioni di avvio e le procedure di ingresso e uscita. Tanto la Ram quanto la Rom sono collegate all'unità centrale di elaborazione.

La memoria di massa, conserva i dati con diversi supporti: nastri magnetici, floppy disk, hard disk. I sistemi di calcolo di grandi dimensioni utilizzano generalmente banchi di memorie su nastro magnetico.

d) I dispositivi di uscita

I dispositivi di uscita rendono accessibile all'operatore, attraverso la loro visione, risultati dei calcoli e delle operazioni eseguite dall'elaboratore elettronico. Il dispositivo più comune è il video; altri sono la stampante e il modem; quest'ultimo consente al computer di trasmettere informazioni attraverso la linea telefonica standard, convertendo il segnale digitale in segnale analogico e viceversa.

Con il termine *software* si fa riferimento all'insieme dei programmi e dei linguaggi di programmazione che rendono operativo l'hardware di un elaboratore elettronico. Per evitare facili confusioni è opportuno distinguere preventivamente:

- il software di base;
- il software applicativo.

Il software di base comprende il sistema operativo e i programmi più vicini all'hardware. I sistemi operativi sono registrati nella Rom e hanno lo scopo di coordinare e adattare i dati che affluiscono da sorgenti diverse, cioè circuiti integrati in grado di elaborare e operare contemporaneamente con l'unità centrale. Si può dire che un sistema operativo è un programma di controllo che, collocato in

una memoria interna permanente, interpreta i comandi dell'operatore che richiedono specifici servizi, quali la stampa o la copiatura di un file.

Il software applicativo comprende programmi e linguaggi utilizzati per funzioni di alto livello, quali l'archiviazione di dati.

Per programma, deve semplicemente intendersi una sequenza di istruzioni che indicano alla macchina le operazioni che deve svolgere per elaborare delle informazioni. Come tali, i programmi possono essere di due tipi:

- vincolati all'elaboratore, come nel caso dei computer che assolvono a un'unica funzione;
- indipendenti dalla struttura dell'elaboratore.

Un elaboratore che svolge applicazioni generali, contiene alcuni programmi imm modificabili, locati nella Rom o nella Cpu; tuttavia, per svolgere le funzioni applicative, ad esempio per realizzare un'immagine grafica, l'elaboratore dipende da programmi esterni.

Si è detto in precedenza che ogni elaboratore riceve i comandi o le istruzioni attraverso un linguaggio di programmazione, tale che a ogni comando sia assicurata una determinata combinazione di cifre binarie. Il linguaggio di macchina è costituito da combinazioni di stati binari comprensibili dall'elaboratore: il programmatore di linguaggio macchina non fa altro che inserire i dati, ogni dato, in forma binaria; un'operazione che ottimizza certamente i programmi, ma che richiede tempi assai lunghi. Questo inconveniente viene attualmente superato con l'apporto di linguaggi particolari, di livello superiore, che usano termini della lingua inglese per esprimere singoli comandi che racchiudono sequenze molto lunghe di istruzioni in linguaggio macchina. Un programma deputato alla traduzione converte a sua volta le istruzioni in linguaggio macchina.

3. Che cos'è Internet

Il termine, ormai di uso quotidiano, sta per rete globale aperta di computer, composta da più reti locali, che consente la comunicazione diretta tra elaboratori elettronici diversi dislocati in tutto il mondo. Le reti Internet utilizzano tutti i mezzi di trasmissione elettronica attualmente disponibili, dalle fibre ottiche e le linee in rame per telefoni, ai canali radio o microonde e le reti satel-

una memoria interna permanente, interpreta i comandi dell'operatore che richiedono specifici servizi, quali la stampa o la copiatura di un file.

Il software applicativo comprende programmi e linguaggi utilizzati per funzioni di alto livello, quali l'archiviazione di dati.

Per programma, deve semplicemente intendersi una sequenza di istruzioni che indicano alla macchina le operazioni che deve svolgere per elaborare delle informazioni. Come tali, i programmi possono essere di due tipi:

- vincolati all'elaboratore, come nel caso dei computer che assolvono a un'unica funzione;
- indipendenti dalla struttura dell'elaboratore.

Un elaboratore che svolge applicazioni generali, contiene alcuni programmi imm modificabili, locati nella Rom o nella Cpu; tuttavia, per svolgere le funzioni applicative, ad esempio per realizzare un'immagine grafica, l'elaboratore dipende da programmi esterni.

Si è detto in precedenza che ogni elaboratore riceve i comandi o le istruzioni attraverso un linguaggio di programmazione, tale che a ogni comando sia assicurata una determinata combinazione di cifre binarie. Il linguaggio di macchina è costituito da combinazioni di stati binari comprensibili dall'elaboratore: il programmatore di linguaggio macchina non fa altro che inserire i dati, ogni dato, in forma binaria; un'operazione che ottimizza certamente i programmi, ma che richiede tempi assai lunghi. Questo inconveniente viene attualmente superato con l'apporto di linguaggi particolari, di livello superiore, che usano termini della lingua inglese per esprimere singoli comandi che racchiudono sequenze molto lunghe di istruzioni in linguaggio macchina. Un programma deputato alla traduzione converte a sua volta le istruzioni in linguaggio macchina.

3. Che cos'è Internet

Il termine, ormai di uso quotidiano, sta per rete globale aperta di computer, composta da più reti locali, che consente la comunicazione diretta tra elaboratori elettronici diversi dislocati in tutto il mondo. Le reti Internet utilizzano tutti i mezzi di trasmissione elettronica attualmente disponibili, dalle fibre ottiche e le linee in rame per telefoni, ai canali radio o microonde e le reti satel-

litari per le telecomunicazioni. Per inserirsi nella ragnatela globale è sufficiente connettere il proprio elaboratore alla rete attraverso le linee telefoniche con un modem, oppure con il telefono cellulare.

Ciò che rende Internet particolarmente invitante e attraente non sta solo nel fatto che singoli computer o gruppi di elaboratori siano in grado di dialogare e di scambiarsi informazioni senza che la distanza geografica o temporale sia di ostacolo, ma soprattutto che lo scambio di informazioni è possibile attraverso un'unica lingua. Ed è proprio in virtù di questa possibilità che sono state create forme di comunicazione estremamente pratiche, semplici ed efficaci, come il *world wide web*, la posta elettronica, la trasmissione di immagini e di filmati ecc. Quando si parla di Internet ci si riferisce perciò sempre alla rete globale; la precisazione è doverosa perché esistono reti limitate ad accesso controllato, denominate *Intranet*, gestite esclusivamente e interamente da società e aziende.

Internet nasce come una evoluzione di un progetto perseguito verso la fine degli anni Settanta del secolo scorso negli Usa dall'*Advanced Research Project Agency* (Arpa). Il progetto, denominato *Arpanet*, rispondeva a un'esigenza strategica: quella di ristrutturare la rete informatica dell'esercito statunitense che, costruita secondo un modello gerarchico attorno a un elaboratore centrale, era evidentemente esposta al grave rischio di essere resa inefficace una volta individuato e attaccato il cuore del sistema. Si pensò così di ridisegnare e ripensare l'intero apparato in modo che ogni elaboratore, benché responsabile dell'invio di informazioni agli altri computer, non dovesse necessariamente far riferimento, diretto o indiretto, all'elaboratore centrale. In caso di attacco e distruzione di uno o più terminali centrali, la rete di collegamento sarebbe rimasta efficiente, con il vantaggio ulteriore di semplificare l'accesso al sistema di nuove unità di elaborazione e, di conseguenza, la crescita della rete. Ogni elaboratore sarebbe venuto a conoscenza degli altri dispositivi a lui identici in virtù dell'accesso a una serie di indirizzi non più centralizzati, ma disposti in innumerevoli nodi periferici.

Il prototipo di Internet risale al 1982, quando furono collegati tra loro duecento elaboratori elettronici; l'anno seguente, il progetto fu fatto proprio dall'esercito Usa come supporto al proprio sistema primario di comunicazioni, collegando tutte le sue basi sparse sul pianeta. Tre anni più tardi, attraverso concessioni a enti e istituzioni pubbliche e di ricerca, le connessioni al sistema erano 28.000. In

seguito alla decisione dell'esercito statunitense di separarsi dalla rete per gestire autonomamente la creazione di un apparato simile a quello sperimentato con successo, da gestire in termini esclusivi, apparato che assumerà il nome di *MilNet*, la rete Internet si è ulteriormente estesa, aggregando anche i primi servizi commerciali. Ad oggi, non è possibile indicare con precisione il numero delle connessioni in rete.

L'enorme sviluppo della rete, compreso il fatto che il sistema di connessione di base non corre più solo sui cavi telefonici, ma si è adattato ai telefoni cellulari, alle trasmissioni via satellite e alla televisione interattiva, non ha cambiato la natura di Internet, che resta una rete unica, globale, aperta e non gerarchizzata. Gran parte delle informazioni e dei servizi in rete è del resto offerto gratuitamente dai gestori, per due buoni motivi: in ragione della divulgazione di informazioni di interesse generale, considerate importanti per la collettività; per motivi di ordine pubblicitario, dal momento che, oltre all'informazione, viene presentato uno spazio a pagamento. I costi relativi al collegamento telefonico alla rete sono in genere vicini a quelli di una semplice chiamata e, d'altra parte, di ciò in fin dei conti si tratta giacché si utilizza una linea fornita da uno dei tanti operatori di telefonia presenti sul mercato. Il servizio vero e proprio di collegamento è in genere fornito dallo stesso operatore.

Tra i mezzi di base offerti dalla rete globale, ce ne sono due che meritano una trattazione specifica.

Il primo di questi mezzi è denominato *world wide web* (www). Dal punto di vista tecnico, www non è altro che un sistema di computer collegati continuamente con la rete Internet capaci di offrire all'utente documenti redatti con un formato particolare chiamato *html*; questi documenti contengono dei collegamenti attivi verso altri tipi di documento o file, ai quali si può agevolmente accedere cliccando su uno dei diversi link creati appositamente dagli autori dei documenti. Il termine *link* indica proprio il punto specifico dal quale l'utente può muoversi verso un altro punto del testo in esame. Ogni pagina www è poi organizzata in ciò che ormai comunemente viene chiamato *sito Internet*, ossia una collezione di documenti o pagine di servizio che fanno capo a un unico indirizzo www. Per questo motivo, ogni volta che sentiamo dire www.qualcosa, pensiamo inevitabilmente a Internet. A ogni indirizzo corrisponde un servizio presente in un punto della rete di cui non si conosce l'ubicazione, ma facilmente raggiungibile digitandolo in uno specifico programma.

Naturalmente, per utilizzare il servizio *www* occorre essere collegati in rete e avere a disposizione un programma di navigazione *wes*, detto *browser*. Si tratta di programmi che consentono all'elaboratore di visualizzare *documenti ipertestuali*, cioè documenti che oltre al testo contengono anche elementi grafici, fotografie, suoni e animazioni. Le funzionalità di un *browser* comprendono il passaggio rapido da un sito a un altro, l'uso di un motore di ricerca per rintracciare informazioni precise sulla rete, la stampa dei documenti. Questi programmi sono interamente gratuiti, dal momento che è possibile scaricarli direttamente dalla rete.

Il secondo mezzo di base su cui merita soffermare l'attenzione è denominato *electronic mail* (e-mail): la posta elettronica. Non è affatto casuale che la posta elettronica sia la risorsa più largamente utilizzata di Internet; consente infatti a chiunque di inviare comodamente messaggi scritti, documenti e immagini risparmiando tempo e denaro rispetto al servizio di posta ordinario. Tutto ciò che serve per inviare e ricevere messaggi è l'accesso a Internet e una casella personale di posta elettronica. Il funzionamento del servizio è semplice. A ogni indirizzo e-mail fa capo una specifica casella postale ospitata dal computer del servizio on-line al quale si è affidata la casella. Quest'ultima è sostanzialmente uno spazio vuoto messo a disposizione su un computer centrale, al quale vengono di volta in volta spediti i messaggi, in attesa della loro lettura. Il computer riceve per conto dell'utente i messaggi in arrivo quando lo stesso non è connesso, e lo avverte della posta ricevuta una volta che l'interessato decide di collegarsi alla rete. L'accesso ai messaggi è consentito al solo utente o a chi ne conosce il nome e la chiave di accesso (*password*) assegnata dal sistema per poter leggere la nota.

Ogni casella è univocamente individuata da un indirizzo che ha la seguente forma:

Nomedell'utente@nomedel servizio.it

La parte che precede il simbolo @, che significa "presso" e si legge *at*, è appunto il nome dell'utente; la parte che segue il simbolo è il nome del computer che ospita la casella e, come tale, non può essere modificato. L'iscrizione a un servizio pubblico gratuito implica la libera scelta del nome da parte dell'utente, che perciò potrà utilizzare il proprio nome anagrafico o un qualsiasi pseudonimo. Ciò che più conta è

che il nome non sia già stato scelto o comunque che non sia motivo di offesa o danno per altri utenti.

Vi sono diversi modi di fruire della posta elettronica; i più diffusi sono le *web mail*, consultabili esclusivamente *on-line*, una volta connessi con Internet, e le *pop mail*, che offrono la possibilità di scaricare i messaggi sul proprio computer e di consultarli senza restare collegati alla rete. La consultazione web ha il vantaggio di poter far accedere l'utente al proprio indirizzo di posta da qualsiasi computer connesso a Internet utilizzando un normale browser, senza dover ricorrere a uno specifico software di posta elettronica.

Uno stesso messaggio e-mail può essere inviato contemporaneamente a più persone; assieme a un messaggio, come già anticipato, è possibile trasmettere via Internet anche degli allegati che possono essere programmi, testi, immagini ecc.

4. L'Intelligenza Artificiale

I progressi compiuti dalla tecnologia informatica e i successi che derivano dalla sua applicazione sono un fatto incontestabile. Eppure, il concetto di elaboratore elettronico, la definizione del suo ruolo in quanto dispositivo di automazione, erano e restano gli stessi. Il computer è una macchina capace di eseguire qualsiasi programma di elaborazione gli venga fornito offrendo così, per ogni possibile insieme di dati, il corrispondente risultato. Il suo ruolo resta quello di consentire l'automazione nel dominio dell'elaborazione dei simboli sostituendo l'operare dell'uomo. Tutto ciò, naturalmente, a una condizione: che l'uomo sia capace di descrivere dettagliatamente, in ogni singolo passaggio, il compito che la macchina è chiamata a svolgere.

Su questo punto è bene essere estremamente chiari. Questa condizione irrinunciabile risponde, del resto, a una particolare, ma non per questo unica né esclusiva modalità con la quale, come sembra, ci disponiamo allorché intendiamo risolvere dei problemi. Si tratta di un approccio che consiste essenzialmente nel riferimento indiretto alle conoscenze specifiche in nostro possesso nei confronti del compito che ci viene proposto. Quindi, per prima cosa, costruiremo un modello del problema da risolvere per poi trovare un metodo di soluzione specifico e particolare dello stesso, ciò che in gergo viene indicato come *l'algoritmo*. L'esecuzione delle procedure indicate dall'algoritmo ci conduce infine alla risoluzione del compito che ci era-

che il nome non sia già stato scelto o comunque che non sia motivo di offesa o danno per altri utenti.

Vi sono diversi modi di fruire della posta elettronica; i più diffusi sono le *web mail*, consultabili esclusivamente *on-line*, una volta connessi con Internet, e le *pop mail*, che offrono la possibilità di scaricare i messaggi sul proprio computer e di consultarli senza restare collegati alla rete. La consultazione web ha il vantaggio di poter far accedere l'utente al proprio indirizzo di posta da qualsiasi computer connesso a Internet utilizzando un normale browser, senza dover ricorrere a uno specifico software di posta elettronica.

Uno stesso messaggio e-mail può essere inviato contemporaneamente a più persone; assieme a un messaggio, come già anticipato, è possibile trasmettere via Internet anche degli allegati che possono essere programmi, testi, immagini ecc.

4. L'Intelligenza Artificiale

I progressi compiuti dalla tecnologia informatica e i successi che derivano dalla sua applicazione sono un fatto incontestabile. Eppure, il concetto di elaboratore elettronico, la definizione del suo ruolo in quanto dispositivo di automazione, erano e restano gli stessi. Il computer è una macchina capace di eseguire qualsiasi programma di elaborazione gli venga fornito offrendo così, per ogni possibile insieme di dati, il corrispondente risultato. Il suo ruolo resta quello di consentire l'automazione nel dominio dell'elaborazione dei simboli sostituendo l'operare dell'uomo. Tutto ciò, naturalmente, a una condizione: che l'uomo sia capace di descrivere dettagliatamente, in ogni singolo passaggio, il compito che la macchina è chiamata a svolgere.

Su questo punto è bene essere estremamente chiari. Questa condizione irrinunciabile risponde, del resto, a una particolare, ma non per questo unica né esclusiva modalità con la quale, come sembra, ci disponiamo allorché intendiamo risolvere dei problemi. Si tratta di un approccio che consiste essenzialmente nel riferimento indiretto alle conoscenze specifiche in nostro possesso nei confronti del compito che ci viene proposto. Quindi, per prima cosa, costruiremo un modello del problema da risolvere per poi trovare un metodo di soluzione specifico e particolare dello stesso, ciò che in gergo viene indicato come *l'algoritmo*. L'esecuzione delle procedure indicate dall'algoritmo ci conduce infine alla risoluzione del compito che ci era-

vamo prefissati, ottenendo così un doppio risultato: da un lato, la soluzione del problema, dall'altro, la possibilità di utilizzare permanentemente questa soluzione, ovvero ogni volta che si ripresenterà un identico problema non avremo bisogno di elaborare un nuovo algoritmo. Potremo insomma affermare che i compiti che sono suscettibili di automazione sono tutti quelli mediante i quali si è capaci di delineare un preciso modello formale e di sviluppare adeguati metodi risolutivi descrivibili con estrema precisione e chiarezza.

L'utilità che deriva dalla elaborazione dei dati è evidente: minori costi, maggiore velocità e affidabilità. Tuttavia, c'è un'altra modalità, anch'essa propria dell'uomo, attraverso la quale giungiamo alla risoluzione dei problemi: quella in cui vengono utilizzate tutte le conoscenze disponibili che, attraverso la mediazione di ragionamenti di validità generale ci conducono, nella loro applicazione, alla soluzione desiderata; una soluzione che, tuttavia, è raggiunta senza produrre alcuna specifica e dettagliata procedura, tale da poter valere in ogni situazione simile a quella affrontata con successo.

Un semplice esempio ci aiuterà a cogliere con chiarezza la diversità dei due approcci che abbiamo descritto. Poniamo di essere stati incaricati di svelare l'identità di un libro a stampa molto antico, del quale sono andati perduti, perché fisicamente deteriorati o mutilati, i dati fondamentali che lo contraddistinguono. Il nostro compito, difficile ma non impossibile, consisterà dunque nel ricostruire i caratteri fondamentali della fisionomia del libro che ci è stato sottoposto; per assolverlo dovremo ricorrere a un ampio ventaglio di conoscenze, quali la storia del libro antico, quella della carta e delle tecniche della sua produzione, la conoscenza delle tecniche tipografiche e i loro esponenti ecc.; soprattutto, dovremo far riferimento a possibili e analoghe esperienze che possiamo aver avuto in passato o far riferimento alle esperienze altrui. Una volta raggiunta la nostra soluzione al problema, non potremo godere del vantaggio di poterla applicare automaticamente a qualsiasi caso analogo o simile che ci si potrà presentare in futuro: il risultato ottenuto è limitato a quel solo caso, non è esportabile, sicché, eventualmente, dovremo iniziare tutto da capo, ma facendo tesoro dell'esperienza acquisita.

Orbene, poste le cose in questi termini dobbiamo chiederci: siamo in grado di costruire una macchina, un elaboratore, capace di operare secondo la modalità appena espressa ed esemplificata, ma senza la necessità di disporre di uno specifico programma per ogni

nuovo problema posto? Ancor più chiaramente: possiamo far fare all'elaboratore elettronico delle attività che, se fossero eseguite dall'uomo, sarebbero considerate intelligenti? Da questo interrogativo, espresso ormai mezzo secolo fa nel corso di un seminario estivo presso il Dartmouth College di Hannover, nel New Hampshire (Usa), ha origine la sfida che, in quella sede, assunse il nome di *Artificial Intelligence* (A.I.), una sfida che siamo ora in grado di poter necessariamente e opportunamente distinguere dalle tecniche di elaborazione cui siamo abituati.

La necessità della distinzione, che è bene aver sempre presente, sta nel fatto che, nel caso dell'elaborazione elettronica tradizionale, l'uomo che la progetta deve conoscere tanto la metodologia di risoluzione del problema quanto le caratteristiche di funzionamento della macchina che si ha in mente di utilizzare, perché è su queste basi che si può costruire l'algoritmo e il programma che produrranno il risultato; nel caso invece di ciò che viene indicato come tecniche di Intelligenza Artificiale, l'uomo non dovrebbe far altro che descrivere alla macchina il problema da risolvere, tutt'al più allegando una serie di esempi che includano descrizioni di situazioni analoghe precedentemente risolte, lasciando alla macchina stessa il compito di individuare la procedura corretta e adeguata al conseguimento del risultato cercato. Il divario tra i due differenti ambiti di elaborazione si fa ancor più netto qualora si consideri l'eventuale capacità dei due sistemi di poter offrire spiegazioni sul modo in cui si è giunti al risultato: il che, evidentemente, implica una valutazione delle scelte operate.

Siamo ora in condizione di illustrare i settori in cui trovano applicazione le tecniche di A.I., indicarne gli sviluppi e le prospettive. I contesti di ricerca propri dell'Intelligenza Artificiale sono di natura teorica e pratica. Sul piano teorico, di base, la possibilità di dotare una macchina delle caratteristiche che, in qualche modo, attribuiamo all'intelligenza umana, prende corpo anzitutto in indagini e ricerche tese a chiarire i termini attraverso i quali una macchina può imparare scambiando dati e messaggi con l'esterno. In questa prospettiva, diviene prioritaria la capacità di riconoscere il linguaggio naturale, cui si collega il problema della visione bidimensionale o tridimensionale, attraverso dei sensori, delle informazioni provenienti dall'esterno. A questi studi si accompagnano, in secondo luogo, le ricerche che riguardano l'acquisizione della capacità di organizzare la conoscenza e, con esse, quella di rielaborare, ossia indi-

care, nuove strategie per la risoluzione di nuovi problemi, in una parola: ragionare. I risultati conseguiti sul piano teorico di base sono particolarmente rilevanti, con apprezzabili ricadute di ordine pratico, benché limitate ad aspetti particolari.

Sul piano applicativo, i settori che vedono coinvolte tecniche riferibili all'Intelligenza Artificiale sono quello dei cosiddetti "sistemi esperti" e quello della robotica.

I *sistemi esperti* trovano applicazione in diversi ambiti, dalla chimica alla medicina, dall'elettronica alla geologia e alla difesa. Si tratta di programmi complessi che permettono all'elaboratore di utilizzare una base costituita da conoscenze specialistiche per risolvere quesiti che richiedono particolari competenze specifiche, proprio come accade quando interpelliamo un esperto per ottenere una valutazione circoscritta a un determinato ordine di problemi.

Un sistema esperto dispone di tre componenti principali:

- l'interfaccia tra l'elaboratore e l'operatore;
- la base delle conoscenze;
- la struttura di controllo.

L'*interfaccia*, cioè il linguaggio di programma, rende possibile l'interazione con il dispositivo sia nel senso di porgli dei quesiti sia di codificarne le risposte. È chiaro che più semplice è il linguaggio di programma, più facile ed efficiente sarà il colloquio.

La *base delle conoscenze* è, semplicemente, l'insieme delle conoscenze specifiche di un richiesto e dato particolare settore, trasferite nella memoria della macchina e ordinate in modo tale da essere elaborate; aspetto, quest'ultimo, particolarmente delicato e difficoltoso perché tali conoscenze devono poter essere opportunamente disposte in rapporto alle relazioni e alle regole di implicazione.

La *struttura di controllo* del processo ha il compito di guidare il sistema nella scelta e nella coordinazione delle varie conoscenze, in modo da conseguire il risultato prefissato.

La tecnologia dell'automazione, che sviluppa e produce dispositivi in grado di compiere determinate operazioni senza l'immediato intervento umano, si è ulteriormente sviluppata negli ultimi vent'anni attraverso la programmazione elettronica. Se gli automatismi tradizionali obbedivano a programmi definiti e incorporati nella configurazione dei dispositivi, le nuove apparecchiature dispongono di

programmi capaci di autoregolazione. In altri termini, con l'apporto di particolari sensori, le attuali macchine automatiche sono capaci di misurare lo scarto tra il comportamento standard e quello effettivamente realizzato, e di intervenire con correzioni e aggiustamenti, al fine di mantenere il processo entro gli ambiti desiderati e configurati. Ad alcune di queste macchine è stato assegnato il nome di *robot* – termine che deriva dalla lingua ceca, e che significa lavoro – e una struttura e fisionomia umanoide per evidenziare la vicinanza delle loro prestazioni a quelle proprie dell'uomo. Ora, poiché migliorando le capacità degli elaboratori, dei sensori e degli apparati di esecuzione risultano migliorate anche le prestazioni dei robot, gli studi dell'Intelligenza Artificiale sono orientati a ricerche e sperimentazioni sugli apparati di esecuzione, ma, soprattutto, sui sensori, deputati a individuare dimensioni e figure degli oggetti alla loro portata.

In una prospettiva non molto distante nel tempo, le tecniche di Intelligenza Artificiale potrebbero fornire due importanti tecnologie che prevedono un raggio di applicazione estremamente vasto:

- le reti neurali;
- gli algoritmi genetici.

Come ben sappiamo, la caratteristica fondamentale di un elaboratore tradizionale è la sequenzialità: il programma esegue una sola istruzione alla volta. Ciò consente, è vero, l'elaborazione di una grande massa di informazioni, ma implica anche l'inconveniente di dover accettare delle funzioni inattive. Il cervello umano, al contrario, opera parallelamente, e può essere considerato come una sterminata rete costituita da cellule, i *neuroni*, tutti collegati tra loro. Su questa base, si è pensato di considerare l'elaborazione delle informazioni come l'interazione di numerose entità che simulano i nostri neuroni e, come questi, si connettono mediante una molteplicità di fibre. Ciascuna di queste entità, denominate unità, riceve segnali dalla connessione che la collega ad altre unità, combina i segnali, che possono essere inibitori o attivatori, ed emette a sua volta un segnale che si propaga quando la sua stimolazione globale supera una certa soglia. Considerate singolarmente, le nostre unità sono poco "intelligenti", ma connesse tra loro danno luogo a un'unità "intelligente" con capacità di apprendimento dovuta al fatto che le connessioni tra le unità tendono a

evolvere nel tempo modificando i rispettivi pesi in base alla conoscenza acquisita.

Rispetto all'informatica tradizionale, le reti neurali presentano caratteristiche molto rilevanti:

- non necessitano di programmazione perché imparano dagli esempi;
- sono dotate di una memoria che risiede nelle connessioni;
- sono strutture che offrono risposte flessibili.

Gli algoritmi genetici sono stati ideati per riprodurre alcuni processi propri dell'evoluzione naturale degli organismi viventi e per realizzare programmi basati su elaboratori capaci di risolvere problemi molto complessi attraverso un processo evolutivo. I presupposti della teoria sono i seguenti:

- come in natura, gli algoritmi genetici generano una popolazione cromosomica sempre migliore, attraverso la manipolazione degli agenti della popolazione precedente;
- come in natura, gli algoritmi ignorano le caratteristiche del problema da risolvere;
- l'unica valutazione che può giungere agli algoritmi è inerente al progresso cromosomico della popolazione, valutazione che determina, da parte degli stessi algoritmi, la selezione dei cromosomi e il loro progressivo miglioramento in relazione alla loro interazione con l'ambiente.

Gli algoritmi genetici si avvalgono così di un procedimento basato su tre operatori: la riproduzione, cioè la selezione degli individui; il cambiamento delle informazioni genetiche; la mutazione ovvero la possibilità di variare una piccola parte delle informazioni genetiche degli individui.

CONSIDERAZIONI ETICHE

Se l'educazione e l'informazione si rivelano strumenti indispensabili per poter svolgere un'efficace e duratura opera di recupero e tutela dell'ambiente naturale, esse manifestano tutta la loro crucialità quando la problematica investe direttamente la persona umana nella sua unicità e completezza.

L'ampiezza e la profondità delle conoscenze raggiunte dalle scienze della vita, unite al livello di accuratezza e di precisione delle procedure messe a punto dall'ingegneria genetica, sono note a tutti. Allo stesso modo, è comune la percezione della rivoluzione che gli straordinari strumenti di elaborazione di cui oggi disponiamo, grazie alle conquiste teoriche e pratiche delle discipline informatiche, hanno operato sul piano della comunicazione; una rivoluzione che per le sue potenzialità ha supportato e continua a supportare i più svariati contesti scientifici e tecnologici.

Tutto ciò apre indubbiamente un orizzonte che si prospetta carico di progresso: la possibilità di estendere e rendere accessibile globalmente l'informazione significa essenzialmente continuo scambio di conoscenze ed esperienze e creazione di nuove opportunità. Ma, d'altro canto, questo stesso sviluppo materiale e culturale pone problemi e sviluppa situazioni inattese e cruciali, decisive per l'intera umanità, che non possono che indurre a un'attenta presa di coscienza dei valori in gioco e, di conseguenza, alla formulazione di norme di comportamento capaci di illuminare e guidare le scelte del singolo e delle nazioni.

Le biotecnologie sollevano rilevanti questioni etiche che investono concretamente tanto l'ambito ambientale e della salute umana quanto quello delle relazioni economiche e politiche tra gli Stati e il dominio delle stesse abitudini sociali e della quotidianità di miliardi di persone. Riguardano anzitutto il problema ambientale e quello della salute umana in quanto diviene legittimo interrogarsi sull'uso delle biotecnologie per limitare l'impatto che l'attività umana provoca sull'ambiente, in difesa e per la valorizzazione del-

la biodiversità; ma, per converso, non ci si può esimere dall'indagare la tipologia di protezione che può essere assicurata all'ambiente esterno e alla salute umana di fronte a eventuali rischi derivanti da un uso improprio delle nuove scoperte. In tal senso, come assicurare la libertà e l'autonomia dell'individuo? In che modo garantire la tutela della persona e della dignità umana sul piano della sperimentazione biomedica e, soprattutto, nei confronti della clonazione? Le biotecnologie investono poi l'ambito delle relazioni economiche e politiche tra gli Stati, sicché appare quanto mai rilevante e delicato individuare un equilibrio tra la richiesta di sviluppo nelle attività produttive, di ricerca e formazione biotecnologica, e l'esigenza che questo sviluppo sia sostenibile. Il che significa, tra l'altro, temperare la necessaria e dovuta prudenza in merito ai tempi della sperimentazione scientifica; e soprattutto, si pone il fondamentale problema dell'equità sul piano delle risorse per il progresso delle tecniche biologiche e della partecipazione alle relative iniziative, specie nei riguardi dei Paesi tecnologicamente meno attrezzati per i quali è vitale stabilire i termini di un loro accesso che non pregiudichi tuttavia le loro caratteristiche economiche. Sul terreno della quotidianità è infine doveroso porsi il problema di come colmare l'assenza di conoscenze scientifiche sulle questioni connesse con le biotecnologie da parte dell'opinione pubblica e, in particolare, in che modo diffondere una corretta informazione scevra da ogni forma di pregiudizio. Orbene, tutto questo mette in evidenza la radicalità e l'estensione dei rapporti richiesti dalle biotecnologie, e può esser ridotto e condensato nella difficile impresa di trovare un equilibrio fra efficienza economica, tutela dei diritti individuali e giustizia sociale.

Ciò detto, prima di entrare direttamente nel merito della questione e individuare i criteri che stanno alla base di una corretta valutazione etica delle biotecnologie, è opportuno avanzare una semplice e breve considerazione circa l'attività della scienza, sia essa teorica che pratica. Per definizione, la scienza è ricerca della verità sia per ciò che consta la natura, l'ordine intrinseco delle cose, che l'uomo, cioè lo stesso soggetto conoscente. In questo senso, il desiderio del sapere non solo deve essere considerato come un'inclinazione in sé buona, ma deve anche essere visto come uno dei fondamenti della stessa dignità umana. Ciò significa che se la conoscenza è di per sé un valore assoluto, mentre la non conoscenza è un disvalore, ciò che deve essere doverosamente sottoposto a serrata e critica valuta-

zione non è né il desiderio di conoscere né il conoscere stesso. Il giudizio morale deve invece riguardare in primo luogo le modalità che la ricerca scientifica può adottare, così come le conseguenti applicazioni che da essa possono discendere; in secondo luogo, gli specifici obiettivi che possono orientare il percorso della ricerca. Infine, la possibilità di alterare gravemente tanto l'ambiente umano, sia esso quello proprio della persona che della comunità delle persone, sia l'ordine naturale. Non è così casuale, ma altamente significativo, che anche da parte dello stesso mondo scientifico si avverta la necessità di affiancare, accanto alla riflessione bioetica, nuovi ambiti quali l'etica della scienza e dell'informazione scientifica.

1. Il principio di precauzione

La conoscenza dei meccanismi di base che regolano i fenomeni vitali e le possibilità ormai acquisite di intervenire non più solo indirettamente ma, si badi bene, *direttamente* sulle informazioni che guidano in qualche modo l'evoluzione delle specie viventi, ha posto per la prima volta l'uomo nella condizione di modificarne le caratteristiche piegandole a propri fini, alle proprie esigenze e aspettative. Operare sulla vita stessa, sui mattoni fondamentali attraverso i quali essa è venuta a manifestarsi e imporsi, non è affare da poco. Gli equilibri sui quali siamo in condizione di intervenire – è bene dirlo con estrema chiarezza – sono instabili: lo sono, perché sempre compresi in un processo dinamico di interazioni tra condizioni interne all'organismo e condizionamenti provenienti dall'ambiente esterno. Questa precarietà, che non deriva semplicemente dall'insufficienza delle conoscenze che non garantiscono più una corretta previsione del rischio, ma è in gran parte dovuta alla complessità degli esseri viventi che sono oggetto di modificazione, impone rigore, prudenza e lungimiranza.

Poste le cose nei termini appena elencati, oltre l'accertamento dei fatti, di competenza scientifica, la previsione delle conseguenze e la valutazione del rapporto tra i rischi e gli eventuali benefici, si è avvertita la necessità e l'urgenza di adottare un principio di valutazione più largo e capace di commisurare all'incertezza dei fatti un'indicazione di prudenza. In mancanza di possibilità oggettiva di rischio, il principio di precauzione consente di superare l'impossibilità di un pronunciamento oggettivo favorendo la prudenza. L'assenza di prove scientificamente riconosciute tali di

un'eventuale probabilità di danno viene così considerata come una dimostrazione non dell'affidabilità della procedura, ma dell'impossibilità di escludere che il danno si verifichi. Detto in altre parole, se non possiamo provare che vi sarà danno, non per questo possiamo escluderlo.

La cautela e la precauzione diventano operative e si misurano naturalmente sulla severità dei controlli, che non può essere limitata alla sola fase sperimentale ma, come auspicabile, dovrebbe essere estesa anche alle tecniche e alle produzioni tradizionali. Tuttavia, è più che evidente che il principio di precauzione non può essere considerato fine a se stesso, giacché ciò implicherebbe di fatto una scelta verso l'indecidibilità, l'incapacità, cioè, di compiere un'opzione che trova il suo fondamento solo sul piano logico prudenziale. Se interpretato in senso restrittivo, il principio di precauzione conduce inevitabilmente all'immobilismo; se, al contrario, di tale principio si evidenzia la natura euristica, come stimolo all'avanzamento della ricerca per individuare procedure ancor più rigorose cui affiancare specifici programmi di valutazione e di gestione del rischio, allora se ne guadagnerà in conoscenza e ciò consentirà di utilizzare al meglio le opportunità offerte dalle biotecnologie. Del resto, bisogna tener presente che una corretta valutazione etica deve contemplare l'effetto complessivo di un'azione su soggetti diversi, anzi, la valutazione dovrebbe tener conto della probabilità di eventuali danni anche nei confronti delle generazioni future, sia essa una probabilità bassa di grave danno sia elevata, ma di danno lieve, come pure il cumularsi di lievi danni ricorrenti su un medesimo soggetto o un rischio minimo che però riguarda altre persone. Così, se la bassa probabilità di un rischio abbraccia un numero di persone sufficientemente vasto, o l'evento che può provocare la situazione di rischio è tendenzialmente frequente, il giudizio etico deve tener presente che l'impatto complessivo del rischio compensa la bassa probabilità che esso si verifichi.

2. Priorità ed equità

Difficilmente si potrà negare che, sul piano etico, la nutrizione e la salute rappresentano, in un mondo sempre più popolato, delle priorità assolute. Nell'anno 2000 la popolazione mondiale ha raggiunto i 6 miliardi di individui e le statistiche prevedono, per

il 2075, un tetto di 10 miliardi. La scelta degli obiettivi e la formulazione dei programmi che si distinguono per l'opzione a favore delle biotecnologie deve dunque necessariamente fondarsi, sulla base dei criteri dell'urgenza e della vastità dei problemi, su una valutazione oggettiva dell'utilità sociale della loro applicazione sui versanti dell'alimentazione e della sanità. In questo senso, l'accesso ai risultati offerti dalle biotecnologie come nuovi prodotti farmaceutici e terapie salvavita, devono essere garantiti in modo imparziale, come pure la distribuzione proporzionata degli utili e dei vantaggi che il settore agroalimentare può registrare. Tutto questo può essere reso possibile attraverso l'elaborazione e il consenso su strategie economiche di compartecipazione tra settore pubblico e settore privato nella ricerca e sviluppo delle biotecnologie, tale da consentire una valutazione oggettiva dei rischi e dei benefici per l'uomo e per l'ambiente, che favorirà indubbiamente la scelta degli obiettivi prioritari.

In ogni caso, all'efficienza economica deve poter essere associato il principio di giustizia; proprio per questo, l'accesso ai vantaggi derivanti dalle nuove tecniche biologiche richiede inequivocabilmente un serio impegno del capitale pubblico e una proficua e responsabile collaborazione con gli istituti privati di ricerca. In particolare, i Paesi in via di sviluppo e quelli ancor più arretrati sulla strada del progresso sociale ed economico devono godere di questa condizione di equità: non si deve del resto dimenticare che proprio questi ultimi, pur disponendo della maggior parte delle risorse genetiche derivanti dalla biodiversità, per la loro arretratezza sul piano delle conoscenze teoriche e pratiche sono costretti a dipendere dal mondo sviluppato e ricco. Di qui, la necessità di elaborare norme vincolanti per i Paesi produttori, che ovviamente traggono utili economici dall'esportazione di prodotti geneticamente modificati, all'incentivazione dello sviluppo tecnologico e alla compartecipazione dei benefici derivanti dallo sfruttamento delle varietà. Al contempo, è indispensabile promuovere la ricerca finalizzata al conseguimento di un'agricoltura che sia sostenibile sul piano globale, incoraggiare le organizzazioni internazionali del settore per sostenere lo sviluppo adeguato ai bisogni dell'agricoltura del Terzo mondo, infine incentivare le iniziative private su programmi di ricerca di particolare importanza per i Paesi sottosviluppati, dei cui risultati, compresi gli eventuali brevetti, questi ultimi dovrebbero poter godere.

3. Educare alla responsabilità

Come già in precedenza è stato sottolineato, il principio di responsabilità può e deve essere considerato come il fondamento morale di ogni riflessione che prenda in considerazione i nostri doveri verso le generazioni presenti e quelle future e, in generale, nei confronti di tutti i viventi ai quali possiamo arrecare danno attraverso i nostri atti e comportamenti. Nel contesto della riflessione bioetica sulle biotecnologie, il principio di responsabilità è chiamato a svolgere un ruolo non solo in merito all'esame dei fini perseguiti, dei mezzi che vengono impiegati e delle circostanze nelle quali si concretizza la loro applicazione, ma anche nei riguardi delle conseguenze di un tipo di pratica che non ha ancora potuto avvalersi di una solida verifica nel lungo periodo. Ciò comporta l'impegno a sensibilizzare e promuovere, ai diversi livelli, ogni tipo di attività tesa alla formazione di comportamenti responsabili.

4. Biodiversità e impatto ambientale

La ricca diversità delle specie viventi, così fondamentale e necessaria per l'ecosistema naturale e per l'uomo, è, di fatto, un patrimonio seriamente compromesso: la sua tutela è un dovere tanto sul versante della prevenzione di una possibile crisi ecologica globale quanto su quello della trasmissione alle generazioni future di un bene così indispensabile, del quale l'umanità ha goduto e gode tutt'ora. In questa prospettiva le biotecnologie possono svolgere un ruolo positivo non secondario, dal momento che l'utilizzo di organismi viventi o di loro parti può consentire non solo l'acquisizione di informazioni e conoscenze rilevanti, ma anche di riequilibrare situazioni ambientali compromesse. Tutto ciò si presenta dunque come motivazione aggiuntiva affinché la coltura di varietà geneticamente modificate sia preceduta da rigorose indagini relative all'impatto ambientale che esse possono provocare sull'intero sistema, sulla salute umana, sulle interazioni sia con altre coltivazioni transgeniche sia con quelle tradizionali. Il principio di precauzione assume qui un ruolo particolarmente rilevante e, accanto a esso, l'esigenza che i Paesi tecnologicamente meno avanzati siano gradualmente ma concretamente posti nella condizione di acquisire e gestire le nuove conoscenze e tecniche in modo da poter serenamente richiedere un consenso informato sullo sfruttamento delle risorse genetiche e, dunque, esercitare con autonomia e competenza l'in-

dispensabile controllo per la sicurezza biologica. Allo stato attuale, mancano tuttavia strumenti in grado di armonizzare le normative relative alla tutela ambientale e quelle di natura commerciale derivanti da accordi internazionali.

5. Autonomia e informazione

La nuova situazione che si è venuta a delineare con l'avvento delle biotecnologie richiede urgentemente di provvedere, sul piano giuridico ed etico, al deciso riconoscimento del diritto a essere informati correttamente e, di conseguenza, alla possibilità di scegliere liberamente nei riguardi di preventivate situazioni di rischio, sia che questo risulti effettivamente previsto, come nel caso di sostanze farmaceutiche o nuove terapie, sia che esso resti indeterminato perché valutabile solo nel lungo periodo, come nel caso degli organismi geneticamente modificati.

Sul piano della ricerca e delle tecnologie biomediche il consenso informato del paziente è già un elemento acquisito sul piano internazionale. Il principio del consenso informato alla conoscenza degli eventuali rischi e benefici per il soggetto, e le relative informazioni circa la natura della ricerca in atto e la provenienza dei finanziamenti di cui si avvale, comprende anche il diritto all'assistenza o al rimborso qualora non si partecipi alla sperimentazione. Resta in ogni caso importante fare appello alla responsabilità dei ricercatori per il rispetto delle norme cliniche, come pure sollecitare il controllo pubblico delle ricerche in corso, anche se il loro finanziamento proviene da settori privati. Dal momento che nell'espressione del consenso entrano in gioco anche fattori di ordine emotivo, sarebbe auspicabile che anche su questo particolare e delicato aspetto fosse prevista una specifica formazione alle tecniche relazionali da parte del personale, specialistico e no, direttamente coinvolto.

Sul piano degli organismi transgenici che chiamano in causa direttamente l'alimentazione c'è ancora molto da fare. È doveroso precisare che il consumatore ha il diritto di poter compiere delle scelte informate, rese tali ad esempio dall'etichettatura e dalla tracciabilità dei cibi che contengono organismi geneticamente modificati, come si sta provvedendo, seppur tra molti ostacoli, in sede di normativa europea. D'altronde, non c'è dubbio che il diritto d'informazione viene naturalmente a interagire con il diritto alla salute.

Anzitutto, l'acquisizione della conoscenza delle sostanze utilizzate per i prodotti dell'alimentazione umana consente in via preventiva di evitare la loro assunzione da parte di tutti quei consumatori che, per motivi di sensibilità e tolleranza soggettivi e individuali, ne verrebbero danneggiati o esposti a seri rischi sanitari; in secondo luogo, l'informazione rende immediatamente più sicura, perché più oggettiva, qualsiasi indagine di carattere epidemiologico sugli effetti a medio e lungo termine, derivanti dal consumo di prodotti che utilizzano organismi geneticamente modificati, visto che l'orizzonte dell'indagine è perfettamente definito perché riguarda tutti coloro che, in una determinata popolazione, fanno di aver consumato determinate sostanze.

6. Brevetti viventi

La questione relativa alla possibilità di brevettare organismi viventi è quanto mai attuale. La prospettiva è estremamente delicata per la natura stessa dell'oggetto del brevetto e per le implicazioni che vengono inevitabilmente a prospettarsi tanto dal punto di vista dei vantaggi derivanti dalle biotecnologie alimentari quanto sul terreno biomedico circa l'accesso equo alle cure e alle terapie rese disponibili. Si tratta di aspetti che sovrastano enormemente la pur legittima tutela degli utili che ogni brevetto comporta.

Qui, più che altrove, il preciso chiarimento dei termini in gioco si rivela cruciale. Che vi sia una richiesta di protezione intellettuale da estendere alle novità biotecnologiche è certo giustificato dagli ingenti investimenti di risorse umane e finanziarie finalizzate all'utilizzazione di materiale genetico; tuttavia, la brevettabilità, se così si può dire, non può riguardare questo materiale vivente ma semmai le tecniche e le procedure opportune che derivano direttamente dalle conoscenze raggiunte in merito alla struttura e alla funzione dei geni. Detto in altri termini, occorre distinguere quanto più marcatamente possibile tra legittima brevettabilità delle tecniche e delle applicazioni e il divieto di brevettare il patrimonio della conoscenza. A ogni modo, il genoma umano, che con bizzarra espressione è stato definito dall'Unesco Patrimonio Mondiale, non può essere sottoposto a brevetto sia perché il corpo umano o parti di esso non sono commerciabili sia perché verrebbe meno, come stiamo per appurare, il rispetto della dignità dell'uomo.

Si rende allora urgente una forte sensibilizzazione internazionale,

da sviluppare in un clima di rispettoso e onesto dialogo sul diritto della proprietà intellettuale tale da affermare l'importanza cruciale di garantire un equilibrato ritorno economico degli investimenti compiuti, ma anche di un accesso il più possibile conveniente dei Paesi poveri alle nuove tecniche e ai loro prodotti. In tal senso, possono essere seriamente proposte allo studio soluzioni quali quella di creare una forma di brevetto da considerarsi esclusivo Patrimonio Mondiale, ma anche brevetti particolari e collettivi riguardanti le coltivazioni e le tecniche mediche tradizionali.

7. Dignità umana e clonazione

La dignità dell'uomo, fondamento che garantisce l'integrità e l'invulnerabilità del corpo e dell'identità individuale, è la condizione che rende possibile il riconoscimento dell'essere umano come valore in sé, sicché sono da ritenersi violazioni della stessa dignità tutte quelle azioni finalizzate o semplicemente orientate a impoverire e ridurre tale valore assoluto per il conseguimento di beni materiali, come la commercializzazione degli organi umani e degli stessi individui, o simbolici, come nel caso della clonazione. Violazioni alla dignità dell'uomo sono allo stesso modo le conseguenze che determinate scelte possono avere direttamente sulla vita nascente e indirettamente sulle generazioni future, come del resto sulle relazioni sessuali, i legami parentali naturali o simbolici.

La clonazione umana, quale aspetto particolarmente eclatante delle applicazioni proprie dell'ingegneria genetica, rende drammaticamente manifesta la violazione della dignità della persona. Su questo piano è comunque opportuno distinguere due diverse tipologie di intervento:

- quella tesa alla prevenzione e alla cura, nei casi di patologie genetiche o somatiche;
- quella che anziché modificare uno status genetico anomalo si propone di manipolarlo con l'inserimento di determinati caratteri non previsti, ma funzionali al conseguimento di fini estranei alla prevenzione e alla cura.

Queste due tipologie sono regolate da due criteri o principi fondamentali, che devono essere affermati con fermezza e applicati con intransigenza: il principio di identità dell'individuo umano; il prin-

cipio di identità della specie umana. Per il primo principio, l'identità di ogni singolo individuo dipende, in termini costitutivi ma non assoluti, dal suo patrimonio genetico, quindi manipolare o alterare questo patrimonio significa indurre delle caratteristiche improprie che non appartengono in via diretta all'individuo stesso; per il secondo principio, l'identità individuale viene a iscriversi nel più ampio contesto della specie uomo, dal momento che ogni singolo soggetto è tale perché partecipa di un patrimonio genetico comune.

Tenuto presente che l'acquisizione di conoscenze e di tecniche sofisticate consente di diagnosticare precocemente il rischio dell'insorgere di malattie, deve essere riconosciuta la necessità di controlli di qualità sulle tecniche medesime che, prima di essere impiegate, dovranno sottostare a un'ampia sperimentazione. Posto ciò, nei riguardi della prima tipologia di intervento occorre distinguere la terapia genica delle cellule germinali da quella delle cellule somatiche. Nel caso delle cellule germinali, l'intervento teso a correggere deviazioni o anomalie cromosomiche è da considerarsi lecito, sempre che non intacchi l'integrità del paziente, con il vantaggio di estendere anche ai discendenti il beneficio. Nel caso delle cellule somatiche, l'intervento è lecito quando riguarda aspetti che siano convenienti con il rispetto della persona e i benefici che da esso possono derivare. Ogni intervento che rientri nell'ambito della seconda tipologia deve invece essere considerato illecito alla luce dei principi affermati.

Più articolato è il giudizio che deve essere espresso in merito alla clonazione riproduttiva e terapeutica. La clonazione riproduttiva animale può essere considerata lecita se ha come scopo la ricerca scientifica orientata ad ambiti, come quelli della salute, dell'alimentazione ecc., che risultano effettivamente utili per l'uomo. Essa deve tuttavia essere regolata e vincolata a precise garanzie circa la conservazione della biodiversità, la salvaguardia dell'uomo da eventuali pericoli, lo sfruttamento incontrollato delle specie animali.

La clonazione riproduttiva umana deve essere considerata sempre e in ogni caso illecita, di diritto e di fatto. In linea di diritto, perché viola direttamente il principio di individualità, cui viene ad aggiungersi quello della assoluta indisponibilità della persona umana a essere considerata come un mezzo anziché come un fine, coinvolgendo così anche il principio di identità della specie umana. L'identità umana integralmente considerata è unica, irripetibile e non riducibile alla sua sola componente genetica. Presa per se stessa, l'identità

genetica non esaurisce l'identità biologica, perché fattori ambientali possono indurre eventuali mutazioni. Sicché, dal punto di vista biologico, l'identità personale implica un patrimonio genetico unico, sul quale nessuno ha il diritto di esercitare un dominio. Lo sviluppo della personalità individuale non può poi prescindere dal condizionamento esercitato dall'educazione e dall'ambiente culturale di appartenenza. Il carattere di unicità e integralità dell'individuo umano implica così la sua totale indisponibilità a essere considerato come uno strumento, come evidentemente richiesto dalla clonazione riproduttiva che, di fatto, implicherebbe gravissime e inaccettabili conseguenze. In primo luogo, violando la stessa conoscenza scientifica della natura, la pratica della clonazione riproduttiva umana darebbe origine a una selezione di individui pesantemente compromessi, proprio dal punto di vista genetico, sul piano della lotta per la sopravvivenza; il secondo luogo, la possibilità di selezionare e pianificare delle generazioni di individui su un modello prestabilito, ad esempio solo ed esclusivamente femmine, comporterebbe tra le altre cose, l'annientamento di ogni vincolo di parentela e, quindi, dei rapporti tra gli individui.

La valutazione etica relativa alla clonazione terapeutica, ovvero l'uso delle cellule staminali, si risolve interamente nella risposta all'interrogativo fondamentale inerente alla definizione stessa di inizio della vita umana, dell'essere umano in quanto persona. La questione, che lo si voglia o meno, va ben oltre il responso offerto dalla conoscenza scientifica e abbraccia orizzonti e condizioni di natura eminentemente filosofica, perché verte sulla convenienza delle nozioni di individuo umano e di persona umana.

Sul piano strettamente scientifico è possibile affermare quanto segue:

- l'embrione, cioè l'individuo che si forma in seguito al concepimento, è una realtà totalmente e assolutamente nuova nello scenario della vita. L'embrione è un *nuovo* e *diverso* organismo che presenta un corredo cromosomico proprio di 46 cromosomi, metà da parte maschile, metà da parte femminile;
- l'embrione è un organismo umano perché proveniente dalla fusione delle cellule germinali umane maschili e femminili: appartiene dunque alla specie biologica *Homo sapiens sapiens*;
- l'embrione è un organismo che segue un proprio, esclusivo e autonomo programma, dal momento che possiede il suo peculiare Dna;

- la programmazione, cioè lo sviluppo, manifesta quattro fondamentali caratteristiche.

La prima caratteristica è l'unità biologica del nuovo individuo; tutti i suoi elementi sono infatti perfettamente coordinati e, conseguentemente, si sviluppano come parti di un unico insieme. La seconda caratteristica è quella della coordinazione. In virtù dell'unitarietà del processo di sviluppo tutte le attività sono tra loro coordinate: la moltiplicazione cellulare delle fasi iniziali è integrata. La terza caratteristica è quella della continuità sia sul piano quantitativo sia qualitativo della differenziazione delle funzioni. Non si assiste cioè a nessuna interruzione o rottura traumatica del processo, ma a una continuità che ci porta dall'embrione fino all'uomo adulto. La quarta e ultima caratteristica è quella della gradualità per la quale lo sviluppo unitario e progressivo dell'individuo giunge al suo compimento.

L'interrogativo che si pone a questo punto è cruciale. Questo individuo che appartiene alla specie umana può e deve essere identificato come persona? Rispondere significherà fare appello non solo ai dati che ci offre la biologia, peraltro diversamente interpretabili, ma anche alla conoscenza filosofica e metafisica.

Da una parte, in effetti, i dati scientifici potranno supportare una visione che considera non l'embrione ma, a rigore, lo stesso zigote, un individuo appartenente alla specie uomo che è persona. L'unità e la continuità messe in rilievo implicherebbero necessariamente che, fin dal concepimento, si sia in presenza non di un individuo umano che potenzialmente sarà persona, bensì di un individuo umano che è persona. Insomma, nei diversi stadi:

zigote → *morula* → *blastula* → *embrione* → ...

ci troveremmo di fronte al medesimo e unico soggetto. La persona umana adulta, si concluderà, denota evidentemente una differente maturazione tanto sul piano biologico che psicologico e spirituale rispetto alla vita embrionale, ma ciò non implica affatto una frattura, un salto. Al contrario, e la caratteristica della gradualità lo proverebbe, si ha questa determinata maturità proprio perché essa è avvenuta nell'ambito della stessa identità personale.

Dall'altra parte, in modo analogo, le medesime conoscenze scientifiche potranno essere utilizzate solo ed esclusivamente per afferma-

re la specificità biologica. La vita personale, la soggettività, viene lentamente acquisita e presuppone lo sviluppo delle facoltà superiori, aspetto che, non lo si dimentichi, si sviluppa anche in corrispondenza con la situazione ambientale; soprattutto, tali facoltà non sono presenti sin dall'inizio. Affermare che lo zigote e l'embrione sono già persona, si concluderà, significa supporre surrettiziamente un principio a se stante, l'anima, che presiede sul piano della sostanza la materialità di cui siamo costituiti. In quanto tale, questa sostanza che è già tutta presente e che continuerà a esserlo, deve godere dell'immortalità. La concretezza dell'esperienza ci mostra, al contrario, che la morte è il compimento di un programma che è venuto a imporsi tra mille difficoltà e insidie, a prescindere dal grado di sviluppo della personalità.

Orbene, se l'embrione come tale può essere considerato a pieno titolo un individuo appartenente alla specie umana e, come tale, persona, allora è chiaro che la clonazione terapeutica che utilizza cellule staminali embrionali non può essere considerata lecita, per due ordini di motivi. Anzitutto, perché verrebbe meno il principio che impone di considerare l'individuo umano come fine: la produzione di embrioni sarebbe infatti strumentale all'uso delle loro cellule staminali; in secondo luogo, perché il prelievo delle cellule staminali determina la morte dell'embrione. Se, al contrario, l'embrione non è visto che come un ammasso di cellule, è chiaro che la sua utilizzazione non solo può e deve essere considerata lecita, ma persino auspicabile. Merita tuttavia ricordare che le cellule staminali possono essere ottenute anche dal cordone ombelicale e persino dall'individuo adulto; in questo caso, la clonazione terapeutica può essere considerata lecita fatte salve, naturalmente, le precauzioni inerenti alla tecnica stessa e i benefici che essa comporta.

8. Informazione e partecipazione

Se, sul piano delle problematiche biotecnologiche, la necessità da parte del singolo, del consumatore o del fruitore di disporre di un'informazione il più possibile completa e accessibile si fa sempre più urgente e pressante, di pari passo cresce anche la richiesta di una più diretta partecipazione alle decisioni che il legislatore è chiamato ad assumere nei diversi settori interessati, cioè quelli sanitario, agroalimentare, ambientale ecc. Il soddisfaci-

mento di una simile esigenza, che deve anzitutto prendere le mosse da un'attenta e precisa valutazione scientifica delle cose, può essere conseguito attraverso una serena discussione pubblica degli obiettivi, delle priorità che devono essere individuate come campo di applicazione delle nuove tecnologie, ma anche delle loro eventuali alternative, con il coinvolgimento diretto degli stessi ricercatori.

Ma è in generale il tema dell'informazione e della comunicazione, con i risvolti talvolta inquietanti che esse comportano, che necessita di una nuova e attuale riflessione. Il problema, infatti, non riguarda tanto i contenuti e le modalità attraverso i quali essi vengono comunicati, quanto, piuttosto, questioni strutturali e sistemiche che implicano tematiche relative alla distribuzione delle tecnologie e dei loro sofisticati prodotti. Questi ultimi, a loro volta, chiamano in causa elementi di natura politica ed economica inerenti alla proprietà e al controllo dei mezzi di comunicazione.

Circa il primo aspetto, che comunque merita dovuta attenzione, è opportuno tener presente che la necessità, l'importanza e l'utilità di codici deontologici frutto dell'autoregolamentazione non è certamente una recente e ben gradita novità: il giornalismo ne ha avvertito l'esigenza sin dalle sue origini, offrendo soddisfacenti soluzioni. Un codice etico, cioè una serie di regole che vincolano più o meno strettamente il comportamento di chi informa e confeziona l'informazione, presenta delle caratteristiche particolarmente rilevanti. Anzitutto è qualcosa di tangibile, di concreto, capace di orientare e guidare l'attività. La sua importanza dipende naturalmente dalla più o meno ampia rappresentatività, visto che può limitarsi, come indica l'etimologia del termine "deontologico", a una categoria professionale, ma può estendersi anche al governo di una o diverse nazioni. Si tratta, evidentemente, di una convenzione, una deliberazione che, come tale, non presenta alcun carattere di assolutezza, ma che racchiude un'elevata potenzialità. Tutto ciò rende i codici deontologici particolarmente sensibili e attenti alle inevitabili variazioni e modifiche che il progresso delle tecniche e degli stessi strumenti della comunicazione ha imposto e continua a imporre.

L'assunzione di precise responsabilità nei confronti della verità dell'informazione, del suo essere fundamentalmente libera e al servizio del bene – aspetto quest'ultimo che coinvolge anche il settore privato –, è certo un deciso atto di garanzia e un incoraggiante esem-

pio per una partecipazione attiva e critica, necessario ma non sufficiente. È necessario, perché costituisce indubbiamente un forte e autorevole deterrente di ogni possibile tentazione di ricostruzione della realtà, sia essa elettronica o meno, e della sua alienante sovrapposizione all'esperienza reale. È insufficiente, perché la nuova situazione creatasi alla luce della rivoluzione operata sul terreno della comunicazione, ovvero il fenomeno della globalizzazione, solleva interrogativi etici fondamentali e, con essi, problematiche di carattere politico ed economico. Se l'informazione e la comunicazione costituiscono il veicolo della conoscenza, gestire e controllare gli strumenti idonei alla sua diffusione significa esercitare un potere enorme, in particolare nei confronti di chi a tali tecnologie non può accedere. Anche in questo caso, il principio di equità deve poter assolvere un ruolo importante, ad esempio attraverso iniziative che coinvolgano il necessario sforzo pubblico con l'impresa privata per la formazione e la gestione dei sistemi informatici e della comunicazione; agenzie e istituzioni internazionali potrebbero in tal senso svolgere una funzione di orientamento, definizione delle priorità e garanzia nel medio termine degli accordi stipulati tra nazioni e gruppi interessati o tra le stesse nazioni. D'altra parte, globalizzazione non significa semplicemente, ed erroneamente, omogeneizzazione, riduzione e appiattimento passivo delle diversità culturali su un unico modello. Rendere inefficaci le barriere spaziotemporali significa far emergere le diverse particolarità – con le loro specificità –, che devono assumere un ruolo di rilievo e, conseguentemente, godere di tutela. È in questa direzione che, peraltro, occorre dirigersi per contrastare ogni tentazione monopolistica della conoscenza.

Non si può infine banalizzare o considerare con superficialità il fatto che la cresciuta efficienza con la quale gli attuali strumenti informatici hanno velocizzato il flusso e il controllo dei contenuti informativi pone problemi, anche all'interno di nazioni attrezzate sul piano giuridico e politico, di manipolazione o di uso illegittimo dei dati. L'esigenza di soddisfare in misura tangibile, visibile, il desiderio di sicurezza acclamato dalla stessa società civile, se comprensibile e giustificabile non deve far dimenticare che l'informazione e la comunicazione devono essere al servizio della libertà dell'individuo. È noto come una semplice carta di credito permetta l'accesso a informazioni di vitale importanza per l'individuo; allo stesso modo, chiunque possieda un computer con accesso alla posta elettronica o

a Internet, o semplicemente un telefono cellulare, sa bene di poter essere oggetto di controlli indesiderati. La salvaguardia della *privacy*, e l'istituzione della figura del garante, è sicuramente un atto di grande significato; deve essere garantita sia sul versante delle informazioni circa la nostra identità genetica sia su quello più propriamente culturale e sociale, a garanzia di quella libertà che deve poter essere riconosciuta all'essere umano.

CONSIDERAZIONI ETICHE

Se l'educazione e l'informazione si rivelano strumenti indispensabili per poter svolgere un'efficace e duratura opera di recupero e tutela dell'ambiente naturale, esse manifestano tutta la loro crucialità quando la problematica investe direttamente la persona umana nella sua unicità e completezza.

L'ampiezza e la profondità delle conoscenze raggiunte dalle scienze della vita, unite al livello di accuratezza e di precisione delle procedure messe a punto dall'ingegneria genetica, sono note a tutti. Allo stesso modo, è comune la percezione della rivoluzione che gli straordinari strumenti di elaborazione di cui oggi disponiamo, grazie alle conquiste teoriche e pratiche delle discipline informatiche, hanno operato sul piano della comunicazione; una rivoluzione che per le sue potenzialità ha supportato e continua a supportare i più svariati contesti scientifici e tecnologici.

Tutto ciò apre indubbiamente un orizzonte che si prospetta carico di progresso: la possibilità di estendere e rendere accessibile globalmente l'informazione significa essenzialmente continuo scambio di conoscenze ed esperienze e creazione di nuove opportunità. Ma, d'altro canto, questo stesso sviluppo materiale e culturale pone problemi e sviluppa situazioni inattese e cruciali, decisive per l'intera umanità, che non possono che indurre a un'attenta presa di coscienza dei valori in gioco e, di conseguenza, alla formulazione di norme di comportamento capaci di illuminare e guidare le scelte del singolo e delle nazioni.

Le biotecnologie sollevano rilevanti questioni etiche che investono concretamente tanto l'ambito ambientale e della salute umana quanto quello delle relazioni economiche e politiche tra gli Stati e il dominio delle stesse abitudini sociali e della quotidianità di miliardi di persone. Riguardano anzitutto il problema ambientale e quello della salute umana in quanto diviene legittimo interrogarsi sull'uso delle biotecnologie per limitare l'impatto che l'attività umana provoca sull'ambiente, in difesa e per la valorizzazione del-

la biodiversità; ma, per converso, non ci si può esimere dall'indagare la tipologia di protezione che può essere assicurata all'ambiente esterno e alla salute umana di fronte a eventuali rischi derivanti da un uso improprio delle nuove scoperte. In tal senso, come assicurare la libertà e l'autonomia dell'individuo? In che modo garantire la tutela della persona e della dignità umana sul piano della sperimentazione biomedica e, soprattutto, nei confronti della clonazione? Le biotecnologie investono poi l'ambito delle relazioni economiche e politiche tra gli Stati, sicché appare quanto mai rilevante e delicato individuare un equilibrio tra la richiesta di sviluppo nelle attività produttive, di ricerca e formazione biotecnologica, e l'esigenza che questo sviluppo sia sostenibile. Il che significa, tra l'altro, temperare la necessaria e dovuta prudenza in merito ai tempi della sperimentazione scientifica; e soprattutto, si pone il fondamentale problema dell'equità sul piano delle risorse per il progresso delle tecniche biologiche e della partecipazione alle relative iniziative, specie nei riguardi dei Paesi tecnologicamente meno attrezzati per i quali è vitale stabilire i termini di un loro accesso che non pregiudichi tuttavia le loro caratteristiche economiche. Sul terreno della quotidianità è infine doveroso porsi il problema di come colmare l'assenza di conoscenze scientifiche sulle questioni connesse con le biotecnologie da parte dell'opinione pubblica e, in particolare, in che modo diffondere una corretta informazione scevra da ogni forma di pregiudizio. Orbene, tutto questo mette in evidenza la radicalità e l'estensione dei rapporti richiesti dalle biotecnologie, e può esser ridotto e condensato nella difficile impresa di trovare un equilibrio fra efficienza economica, tutela dei diritti individuali e giustizia sociale.

Ciò detto, prima di entrare direttamente nel merito della questione e individuare i criteri che stanno alla base di una corretta valutazione etica delle biotecnologie, è opportuno avanzare una semplice e breve considerazione circa l'attività della scienza, sia essa teorica che pratica. Per definizione, la scienza è ricerca della verità sia per ciò che consta la natura, l'ordine intrinseco delle cose, che l'uomo, cioè lo stesso soggetto conoscente. In questo senso, il desiderio del sapere non solo deve essere considerato come un'inclinazione in sé buona, ma deve anche essere visto come uno dei fondamenti della stessa dignità umana. Ciò significa che se la conoscenza è di per sé un valore assoluto, mentre la non conoscenza è un disvalore, ciò che deve essere doverosamente sottoposto a serrata e critica valuta-

zione non è né il desiderio di conoscere né il conoscere stesso. Il giudizio morale deve invece riguardare in primo luogo le modalità che la ricerca scientifica può adottare, così come le conseguenti applicazioni che da essa possono discendere; in secondo luogo, gli specifici obiettivi che possono orientare il percorso della ricerca. Infine, la possibilità di alterare gravemente tanto l'ambiente umano, sia esso quello proprio della persona che della comunità delle persone, sia l'ordine naturale. Non è così casuale, ma altamente significativo, che anche da parte dello stesso mondo scientifico si avverta la necessità di affiancare, accanto alla riflessione bioetica, nuovi ambiti quali l'etica della scienza e dell'informazione scientifica.

1. Il principio di precauzione

La conoscenza dei meccanismi di base che regolano i fenomeni vitali e le possibilità ormai acquisite di intervenire non più solo indirettamente ma, si badi bene, *direttamente* sulle informazioni che guidano in qualche modo l'evoluzione delle specie viventi, ha posto per la prima volta l'uomo nella condizione di modificarne le caratteristiche piegandole a propri fini, alle proprie esigenze e aspettative. Operare sulla vita stessa, sui mattoni fondamentali attraverso i quali essa è venuta a manifestarsi e imporsi, non è affare da poco. Gli equilibri sui quali siamo in condizione di intervenire – è bene dirlo con estrema chiarezza – sono instabili: lo sono, perché sempre compresi in un processo dinamico di interazioni tra condizioni interne all'organismo e condizionamenti provenienti dall'ambiente esterno. Questa precarietà, che non deriva semplicemente dall'insufficienza delle conoscenze che non garantiscono più una corretta previsione del rischio, ma è in gran parte dovuta alla complessità degli esseri viventi che sono oggetto di modificazione, impone rigore, prudenza e lungimiranza.

Poste le cose nei termini appena elencati, oltre l'accertamento dei fatti, di competenza scientifica, la previsione delle conseguenze e la valutazione del rapporto tra i rischi e gli eventuali benefici, si è avvertita la necessità e l'urgenza di adottare un principio di valutazione più largo e capace di commisurare all'incertezza dei fatti un'indicazione di prudenza. In mancanza di possibilità oggettiva di rischio, il principio di precauzione consente di superare l'impossibilità di un pronunciamento oggettivo favorendo la prudenza. L'assenza di prove scientificamente riconosciute tali di

un'eventuale probabilità di danno viene così considerata come una dimostrazione non dell'affidabilità della procedura, ma dell'impossibilità di escludere che il danno si verifichi. Detto in altre parole, se non possiamo provare che vi sarà danno, non per questo possiamo escluderlo.

La cautela e la precauzione diventano operative e si misurano naturalmente sulla severità dei controlli, che non può essere limitata alla sola fase sperimentale ma, come auspicabile, dovrebbe essere estesa anche alle tecniche e alle produzioni tradizionali. Tuttavia, è più che evidente che il principio di precauzione non può essere considerato fine a se stesso, giacché ciò implicherebbe di fatto una scelta verso l'indecidibilità, l'incapacità, cioè, di compiere un'opzione che trova il suo fondamento solo sul piano logico prudenziale. Se interpretato in senso restrittivo, il principio di precauzione conduce inevitabilmente all'immobilismo; se, al contrario, di tale principio si evidenzia la natura euristica, come stimolo all'avanzamento della ricerca per individuare procedure ancor più rigorose cui affiancare specifici programmi di valutazione e di gestione del rischio, allora se ne guadagnerà in conoscenza e ciò consentirà di utilizzare al meglio le opportunità offerte dalle biotecnologie. Del resto, bisogna tener presente che una corretta valutazione etica deve contemplare l'effetto complessivo di un'azione su soggetti diversi, anzi, la valutazione dovrebbe tener conto della probabilità di eventuali danni anche nei confronti delle generazioni future, sia essa una probabilità bassa di grave danno sia elevata, ma di danno lieve, come pure il cumularsi di lievi danni ricorrenti su un medesimo soggetto o un rischio minimo che però riguarda altre persone. Così, se la bassa probabilità di un rischio abbraccia un numero di persone sufficientemente vasto, o l'evento che può provocare la situazione di rischio è tendenzialmente frequente, il giudizio etico deve tener presente che l'impatto complessivo del rischio compensa la bassa probabilità che esso si verifichi.

2. Priorità ed equità

Difficilmente si potrà negare che, sul piano etico, la nutrizione e la salute rappresentano, in un mondo sempre più popolato, delle priorità assolute. Nell'anno 2000 la popolazione mondiale ha raggiunto i 6 miliardi di individui e le statistiche prevedono, per

un'eventuale probabilità di danno viene così considerata come una dimostrazione non dell'affidabilità della procedura, ma dell'impossibilità di escludere che il danno si verifichi. Detto in altre parole, se non possiamo provare che vi sarà danno, non per questo possiamo escluderlo.

La cautela e la precauzione diventano operative e si misurano naturalmente sulla severità dei controlli, che non può essere limitata alla sola fase sperimentale ma, come auspicabile, dovrebbe essere estesa anche alle tecniche e alle produzioni tradizionali. Tuttavia, è più che evidente che il principio di precauzione non può essere considerato fine a se stesso, giacché ciò implicherebbe di fatto una scelta verso l'indecidibilità, l'incapacità, cioè, di compiere un'opzione che trova il suo fondamento solo sul piano logico prudenziale. Se interpretato in senso restrittivo, il principio di precauzione conduce inevitabilmente all'immobilismo; se, al contrario, di tale principio si evidenzia la natura euristica, come stimolo all'avanzamento della ricerca per individuare procedure ancor più rigorose cui affiancare specifici programmi di valutazione e di gestione del rischio, allora se ne guadagnerà in conoscenza e ciò consentirà di utilizzare al meglio le opportunità offerte dalle biotecnologie. Del resto, bisogna tener presente che una corretta valutazione etica deve contemplare l'effetto complessivo di un'azione su soggetti diversi, anzi, la valutazione dovrebbe tener conto della probabilità di eventuali danni anche nei confronti delle generazioni future, sia essa una probabilità bassa di grave danno sia elevata, ma di danno lieve, come pure il cumularsi di lievi danni ricorrenti su un medesimo soggetto o un rischio minimo che però riguarda altre persone. Così, se la bassa probabilità di un rischio abbraccia un numero di persone sufficientemente vasto, o l'evento che può provocare la situazione di rischio è tendenzialmente frequente, il giudizio etico deve tener presente che l'impatto complessivo del rischio compensa la bassa probabilità che esso si verifichi.

2. Priorità ed equità

Difficilmente si potrà negare che, sul piano etico, la nutrizione e la salute rappresentano, in un mondo sempre più popolato, delle priorità assolute. Nell'anno 2000 la popolazione mondiale ha raggiunto i 6 miliardi di individui e le statistiche prevedono, per

il 2075, un tetto di 10 miliardi. La scelta degli obiettivi e la formulazione dei programmi che si distinguono per l'opzione a favore delle biotecnologie deve dunque necessariamente fondarsi, sulla base dei criteri dell'urgenza e della vastità dei problemi, su una valutazione oggettiva dell'utilità sociale della loro applicazione sui versanti dell'alimentazione e della sanità. In questo senso, l'accesso ai risultati offerti dalle biotecnologie come nuovi prodotti farmaceutici e terapie salvavita, devono essere garantiti in modo imparziale, come pure la distribuzione proporzionata degli utili e dei vantaggi che il settore agroalimentare può registrare. Tutto questo può essere reso possibile attraverso l'elaborazione e il consenso su strategie economiche di compartecipazione tra settore pubblico e settore privato nella ricerca e sviluppo delle biotecnologie, tale da consentire una valutazione oggettiva dei rischi e dei benefici per l'uomo e per l'ambiente, che favorirà indubbiamente la scelta degli obiettivi prioritari.

In ogni caso, all'efficienza economica deve poter essere associato il principio di giustizia; proprio per questo, l'accesso ai vantaggi derivanti dalle nuove tecniche biologiche richiede inequivocabilmente un serio impegno del capitale pubblico e una proficua e responsabile collaborazione con gli istituti privati di ricerca. In particolare, i Paesi in via di sviluppo e quelli ancor più arretrati sulla strada del progresso sociale ed economico devono godere di questa condizione di equità: non si deve del resto dimenticare che proprio questi ultimi, pur disponendo della maggior parte delle risorse genetiche derivanti dalla biodiversità, per la loro arretratezza sul piano delle conoscenze teoriche e pratiche sono costretti a dipendere dal mondo sviluppato e ricco. Di qui, la necessità di elaborare norme vincolanti per i Paesi produttori, che ovviamente traggono utili economici dall'esportazione di prodotti geneticamente modificati, all'incentivazione dello sviluppo tecnologico e alla compartecipazione dei benefici derivanti dallo sfruttamento delle varietà. Al contempo, è indispensabile promuovere la ricerca finalizzata al conseguimento di un'agricoltura che sia sostenibile sul piano globale, incoraggiare le organizzazioni internazionali del settore per sostenere lo sviluppo adeguato ai bisogni dell'agricoltura del Terzo mondo, infine incentivare le iniziative private su programmi di ricerca di particolare importanza per i Paesi sottosviluppati, dei cui risultati, compresi gli eventuali brevetti, questi ultimi dovrebbero poter godere.

3. Educare alla responsabilità

Come già in precedenza è stato sottolineato, il principio di responsabilità può e deve essere considerato come il fondamento morale di ogni riflessione che prenda in considerazione i nostri doveri verso le generazioni presenti e quelle future e, in generale, nei confronti di tutti i viventi ai quali possiamo arrecare danno attraverso i nostri atti e comportamenti. Nel contesto della riflessione bioetica sulle biotecnologie, il principio di responsabilità è chiamato a svolgere un ruolo non solo in merito all'esame dei fini perseguiti, dei mezzi che vengono impiegati e delle circostanze nelle quali si concretizza la loro applicazione, ma anche nei riguardi delle conseguenze di un tipo di pratica che non ha ancora potuto avvalersi di una solida verifica nel lungo periodo. Ciò comporta l'impegno a sensibilizzare e promuovere, ai diversi livelli, ogni tipo di attività tesa alla formazione di comportamenti responsabili.

4. Biodiversità e impatto ambientale

La ricca diversità delle specie viventi, così fondamentale e necessaria per l'ecosistema naturale e per l'uomo, è, di fatto, un patrimonio seriamente compromesso: la sua tutela è un dovere tanto sul versante della prevenzione di una possibile crisi ecologica globale quanto su quello della trasmissione alle generazioni future di un bene così indispensabile, del quale l'umanità ha goduto e gode tutt'ora. In questa prospettiva le biotecnologie possono svolgere un ruolo positivo non secondario, dal momento che l'utilizzo di organismi viventi o di loro parti può consentire non solo l'acquisizione di informazioni e conoscenze rilevanti, ma anche di riequilibrare situazioni ambientali compromesse. Tutto ciò si presenta dunque come motivazione aggiuntiva affinché la coltura di varietà geneticamente modificate sia preceduta da rigorose indagini relative all'impatto ambientale che esse possono provocare sull'intero sistema, sulla salute umana, sulle interazioni sia con altre coltivazioni transgeniche sia con quelle tradizionali. Il principio di precauzione assume qui un ruolo particolarmente rilevante e, accanto a esso, l'esigenza che i Paesi tecnologicamente meno avanzati siano gradualmente ma concretamente posti nella condizione di acquisire e gestire le nuove conoscenze e tecniche in modo da poter serenamente richiedere un consenso informato sullo sfruttamento delle risorse genetiche e, dunque, esercitare con autonomia e competenza l'in-

3. Educare alla responsabilità

Come già in precedenza è stato sottolineato, il principio di responsabilità può e deve essere considerato come il fondamento morale di ogni riflessione che prenda in considerazione i nostri doveri verso le generazioni presenti e quelle future e, in generale, nei confronti di tutti i viventi ai quali possiamo arrecare danno attraverso i nostri atti e comportamenti. Nel contesto della riflessione bioetica sulle biotecnologie, il principio di responsabilità è chiamato a svolgere un ruolo non solo in merito all'esame dei fini perseguiti, dei mezzi che vengono impiegati e delle circostanze nelle quali si concretizza la loro applicazione, ma anche nei riguardi delle conseguenze di un tipo di pratica che non ha ancora potuto avvalersi di una solida verifica nel lungo periodo. Ciò comporta l'impegno a sensibilizzare e promuovere, ai diversi livelli, ogni tipo di attività tesa alla formazione di comportamenti responsabili.

4. Biodiversità e impatto ambientale

La ricca diversità delle specie viventi, così fondamentale e necessaria per l'ecosistema naturale e per l'uomo, è, di fatto, un patrimonio seriamente compromesso: la sua tutela è un dovere tanto sul versante della prevenzione di una possibile crisi ecologica globale quanto su quello della trasmissione alle generazioni future di un bene così indispensabile, del quale l'umanità ha goduto e gode tutt'ora. In questa prospettiva le biotecnologie possono svolgere un ruolo positivo non secondario, dal momento che l'utilizzo di organismi viventi o di loro parti può consentire non solo l'acquisizione di informazioni e conoscenze rilevanti, ma anche di riequilibrare situazioni ambientali compromesse. Tutto ciò si presenta dunque come motivazione aggiuntiva affinché la coltura di varietà geneticamente modificate sia preceduta da rigorose indagini relative all'impatto ambientale che esse possono provocare sull'intero sistema, sulla salute umana, sulle interazioni sia con altre coltivazioni transgeniche sia con quelle tradizionali. Il principio di precauzione assume qui un ruolo particolarmente rilevante e, accanto a esso, l'esigenza che i Paesi tecnologicamente meno avanzati siano gradualmente ma concretamente posti nella condizione di acquisire e gestire le nuove conoscenze e tecniche in modo da poter serenamente richiedere un consenso informato sullo sfruttamento delle risorse genetiche e, dunque, esercitare con autonomia e competenza l'in-

dispensabile controllo per la sicurezza biologica. Allo stato attuale, mancano tuttavia strumenti in grado di armonizzare le normative relative alla tutela ambientale e quelle di natura commerciale derivanti da accordi internazionali.

5. Autonomia e informazione

La nuova situazione che si è venuta a delineare con l'avvento delle biotecnologie richiede urgentemente di provvedere, sul piano giuridico ed etico, al deciso riconoscimento del diritto a essere informati correttamente e, di conseguenza, alla possibilità di scegliere liberamente nei riguardi di preventivate situazioni di rischio, sia che questo risulti effettivamente previsto, come nel caso di sostanze farmaceutiche o nuove terapie, sia che esso resti indeterminato perché valutabile solo nel lungo periodo, come nel caso degli organismi geneticamente modificati.

Sul piano della ricerca e delle tecnologie biomediche il consenso informato del paziente è già un elemento acquisito sul piano internazionale. Il principio del consenso informato alla conoscenza degli eventuali rischi e benefici per il soggetto, e le relative informazioni circa la natura della ricerca in atto e la provenienza dei finanziamenti di cui si avvale, comprende anche il diritto all'assistenza o al rimborso qualora non si partecipi alla sperimentazione. Resta in ogni caso importante fare appello alla responsabilità dei ricercatori per il rispetto delle norme cliniche, come pure sollecitare il controllo pubblico delle ricerche in corso, anche se il loro finanziamento proviene da settori privati. Dal momento che nell'espressione del consenso entrano in gioco anche fattori di ordine emotivo, sarebbe auspicabile che anche su questo particolare e delicato aspetto fosse prevista una specifica formazione alle tecniche relazionali da parte del personale, specialistico e no, direttamente coinvolto.

Sul piano degli organismi transgenici che chiamano in causa direttamente l'alimentazione c'è ancora molto da fare. È doveroso precisare che il consumatore ha il diritto di poter compiere delle scelte informate, rese tali ad esempio dall'etichettatura e dalla tracciabilità dei cibi che contengono organismi geneticamente modificati, come si sta provvedendo, seppur tra molti ostacoli, in sede di normativa europea. D'altronde, non c'è dubbio che il diritto d'informazione viene naturalmente a interagire con il diritto alla salute.

dispensabile controllo per la sicurezza biologica. Allo stato attuale, mancano tuttavia strumenti in grado di armonizzare le normative relative alla tutela ambientale e quelle di natura commerciale derivanti da accordi internazionali.

5. Autonomia e informazione

La nuova situazione che si è venuta a delineare con l'avvento delle biotecnologie richiede urgentemente di provvedere, sul piano giuridico ed etico, al deciso riconoscimento del diritto a essere informati correttamente e, di conseguenza, alla possibilità di scegliere liberamente nei riguardi di preventivate situazioni di rischio, sia che questo risulti effettivamente previsto, come nel caso di sostanze farmaceutiche o nuove terapie, sia che esso resti indeterminato perché valutabile solo nel lungo periodo, come nel caso degli organismi geneticamente modificati.

Sul piano della ricerca e delle tecnologie biomediche il consenso informato del paziente è già un elemento acquisito sul piano internazionale. Il principio del consenso informato alla conoscenza degli eventuali rischi e benefici per il soggetto, e le relative informazioni circa la natura della ricerca in atto e la provenienza dei finanziamenti di cui si avvale, comprende anche il diritto all'assistenza o al rimborso qualora non si partecipi alla sperimentazione. Resta in ogni caso importante fare appello alla responsabilità dei ricercatori per il rispetto delle norme cliniche, come pure sollecitare il controllo pubblico delle ricerche in corso, anche se il loro finanziamento proviene da settori privati. Dal momento che nell'espressione del consenso entrano in gioco anche fattori di ordine emotivo, sarebbe auspicabile che anche su questo particolare e delicato aspetto fosse prevista una specifica formazione alle tecniche relazionali da parte del personale, specialistico e no, direttamente coinvolto.

Sul piano degli organismi transgenici che chiamano in causa direttamente l'alimentazione c'è ancora molto da fare. È doveroso precisare che il consumatore ha il diritto di poter compiere delle scelte informate, rese tali ad esempio dall'etichettatura e dalla tracciabilità dei cibi che contengono organismi geneticamente modificati, come si sta provvedendo, seppur tra molti ostacoli, in sede di normativa europea. D'altronde, non c'è dubbio che il diritto d'informazione viene naturalmente a interagire con il diritto alla salute.

Anzitutto, l'acquisizione della conoscenza delle sostanze utilizzate per i prodotti dell'alimentazione umana consente in via preventiva di evitare la loro assunzione da parte di tutti quei consumatori che, per motivi di sensibilità e tolleranza soggettivi e individuali, ne verrebbero danneggiati o esposti a seri rischi sanitari; in secondo luogo, l'informazione rende immediatamente più sicura, perché più oggettiva, qualsiasi indagine di carattere epidemiologico sugli effetti a medio e lungo termine, derivanti dal consumo di prodotti che utilizzano organismi geneticamente modificati, visto che l'orizzonte dell'indagine è perfettamente definito perché riguarda tutti coloro che, in una determinata popolazione, sanno di aver consumato determinate sostanze.

6. Brevetti viventi

La questione relativa alla possibilità di brevettare organismi viventi è quanto mai attuale. La prospettiva è estremamente delicata per la natura stessa dell'oggetto del brevetto e per le implicazioni che vengono inevitabilmente a prospettarsi tanto dal punto di vista dei vantaggi derivanti dalle biotecnologie alimentari quanto sul terreno biomedico circa l'accesso equo alle cure e alle terapie rese disponibili. Si tratta di aspetti che sovrastano enormemente la pur legittima tutela degli utili che ogni brevetto comporta.

Qui, più che altrove, il preciso chiarimento dei termini in gioco si rivela cruciale. Che vi sia una richiesta di protezione intellettuale da estendere alle novità biotecnologiche è certo giustificato dagli ingenti investimenti di risorse umane e finanziarie finalizzate all'utilizzazione di materiale genetico; tuttavia, la brevettabilità, se così si può dire, non può riguardare questo materiale vivente ma semmai le tecniche e le procedure opportune che derivano direttamente dalle conoscenze raggiunte in merito alla struttura e alla funzione dei geni. Detto in altri termini, occorre distinguere quanto più marcatamente possibile tra legittima brevettabilità delle tecniche e delle applicazioni e il divieto di brevettare il patrimonio della conoscenza. A ogni modo, il genoma umano, che con bizzarra espressione è stato definito dall'Unesco Patrimonio Mondiale, non può essere sottoposto a brevetto sia perché il corpo umano o parti di esso non sono commerciabili sia perché verrebbe meno, come stiamo per appurare, il rispetto della dignità dell'uomo.

Si rende allora urgente una forte sensibilizzazione internazionale,

Anzitutto, l'acquisizione della conoscenza delle sostanze utilizzate per i prodotti dell'alimentazione umana consente in via preventiva di evitare la loro assunzione da parte di tutti quei consumatori che, per motivi di sensibilità e tolleranza soggettivi e individuali, ne verrebbero danneggiati o esposti a seri rischi sanitari; in secondo luogo, l'informazione rende immediatamente più sicura, perché più oggettiva, qualsiasi indagine di carattere epidemiologico sugli effetti a medio e lungo termine, derivanti dal consumo di prodotti che utilizzano organismi geneticamente modificati, visto che l'orizzonte dell'indagine è perfettamente definito perché riguarda tutti coloro che, in una determinata popolazione, fanno di aver consumato determinate sostanze.

6. Brevetti viventi

La questione relativa alla possibilità di brevettare organismi viventi è quanto mai attuale. La prospettiva è estremamente delicata per la natura stessa dell'oggetto del brevetto e per le implicazioni che vengono inevitabilmente a prospettarsi tanto dal punto di vista dei vantaggi derivanti dalle biotecnologie alimentari quanto sul terreno biomedico circa l'accesso equo alle cure e alle terapie rese disponibili. Si tratta di aspetti che sovrastano enormemente la pur legittima tutela degli utili che ogni brevetto comporta.

Qui, più che altrove, il preciso chiarimento dei termini in gioco si rivela cruciale. Che vi sia una richiesta di protezione intellettuale da estendere alle novità biotecnologiche è certo giustificato dagli ingenti investimenti di risorse umane e finanziarie finalizzate all'utilizzazione di materiale genetico; tuttavia, la brevettabilità, se così si può dire, non può riguardare questo materiale vivente ma semmai le tecniche e le procedure opportune che derivano direttamente dalle conoscenze raggiunte in merito alla struttura e alla funzione dei geni. Detto in altri termini, occorre distinguere quanto più marcatamente possibile tra legittima brevettabilità delle tecniche e delle applicazioni e il divieto di brevettare il patrimonio della conoscenza. A ogni modo, il genoma umano, che con bizzarra espressione è stato definito dall'Unesco Patrimonio Mondiale, non può essere sottoposto a brevetto sia perché il corpo umano o parti di esso non sono commerciabili sia perché verrebbe meno, come stiamo per appurare, il rispetto della dignità dell'uomo.

Si rende allora urgente una forte sensibilizzazione internazionale,

da sviluppare in un clima di rispettoso e onesto dialogo sul diritto della proprietà intellettuale tale da affermare l'importanza cruciale di garantire un equilibrato ritorno economico degli investimenti compiuti, ma anche di un accesso il più possibile conveniente dei Paesi poveri alle nuove tecniche e ai loro prodotti. In tal senso, possono essere seriamente proposte allo studio soluzioni quali quella di creare una forma di brevetto da considerarsi esclusivo Patrimonio Mondiale, ma anche brevetti particolari e collettivi riguardanti le coltivazioni e le tecniche mediche tradizionali.

7. Dignità umana e clonazione

La dignità dell'uomo, fondamento che garantisce l'integrità e l'invulnerabilità del corpo e dell'identità individuale, è la condizione che rende possibile il riconoscimento dell'essere umano come valore in sé, sicché sono da ritenersi violazioni della stessa dignità tutte quelle azioni finalizzate o semplicemente orientate a impoverire e ridurre tale valore assoluto per il conseguimento di beni materiali, come la commercializzazione degli organi umani e degli stessi individui, o simbolici, come nel caso della clonazione. Violazioni alla dignità dell'uomo sono allo stesso modo le conseguenze che determinate scelte possono avere direttamente sulla vita nascente e indirettamente sulle generazioni future, come del resto sulle relazioni sessuali, i legami parentali naturali o simbolici.

La clonazione umana, quale aspetto particolarmente eclatante delle applicazioni proprie dell'ingegneria genetica, rende drammaticamente manifesta la violazione della dignità della persona. Su questo piano è comunque opportuno distinguere due diverse tipologie di intervento:

- quella tesa alla prevenzione e alla cura, nei casi di patologie genetiche o somatiche;
- quella che anziché modificare uno status genetico anomalo si propone di manipolarlo con l'inserimento di determinati caratteri non previsti, ma funzionali al conseguimento di fini estranei alla prevenzione e alla cura.

Queste due tipologie sono regolate da due criteri o principi fondamentali, che devono essere affermati con fermezza e applicati con intransigenza: il principio di identità dell'individuo umano; il prin-

da sviluppare in un clima di rispettoso e onesto dialogo sul diritto della proprietà intellettuale tale da affermare l'importanza cruciale di garantire un equilibrato ritorno economico degli investimenti compiuti, ma anche di un accesso il più possibile conveniente dei Paesi poveri alle nuove tecniche e ai loro prodotti. In tal senso, possono essere seriamente proposte allo studio soluzioni quali quella di creare una forma di brevetto da considerarsi esclusivo Patrimonio Mondiale, ma anche brevetti particolari e collettivi riguardanti le coltivazioni e le tecniche mediche tradizionali.

7. Dignità umana e clonazione

La dignità dell'uomo, fondamento che garantisce l'integrità e l'invulnerabilità del corpo e dell'identità individuale, è la condizione che rende possibile il riconoscimento dell'essere umano come valore in sé, sicché sono da ritenersi violazioni della stessa dignità tutte quelle azioni finalizzate o semplicemente orientate a impoverire e ridurre tale valore assoluto per il conseguimento di beni materiali, come la commercializzazione degli organi umani e degli stessi individui, o simbolici, come nel caso della clonazione. Violazioni alla dignità dell'uomo sono allo stesso modo le conseguenze che determinate scelte possono avere direttamente sulla vita nascente e indirettamente sulle generazioni future, come del resto sulle relazioni sessuali, i legami parentali naturali o simbolici.

La clonazione umana, quale aspetto particolarmente eclatante delle applicazioni proprie dell'ingegneria genetica, rende drammaticamente manifesta la violazione della dignità della persona. Su questo piano è comunque opportuno distinguere due diverse tipologie di intervento:

- quella tesa alla prevenzione e alla cura, nei casi di patologie genetiche o somatiche;
- quella che anziché modificare uno status genetico anomalo si propone di manipolarlo con l'inserimento di determinati caratteri non previsti, ma funzionali al conseguimento di fini estranei alla prevenzione e alla cura.

Queste due tipologie sono regolate da due criteri o principi fondamentali, che devono essere affermati con fermezza e applicati con intransigenza: il principio di identità dell'individuo umano; il prin-

cipio di identità della specie umana. Per il primo principio, l'identità di ogni singolo individuo dipende, in termini costitutivi ma non assoluti, dal suo patrimonio genetico, quindi manipolare o alterare questo patrimonio significa indurre delle caratteristiche improprie che non appartengono in via diretta all'individuo stesso; per il secondo principio, l'identità individuale viene a iscriversi nel più ampio contesto della specie uomo, dal momento che ogni singolo soggetto è tale perché partecipa di un patrimonio genetico comune.

Tenuto presente che l'acquisizione di conoscenze e di tecniche sofisticate consente di diagnosticare precocemente il rischio dell'insorgere di malattie, deve essere riconosciuta la necessità di controlli di qualità sulle tecniche medesime che, prima di essere impiegate, dovranno sottostare a un'ampia sperimentazione. Posto ciò, nei riguardi della prima tipologia di intervento occorre distinguere la terapia genica delle cellule germinali da quella delle cellule somatiche. Nel caso delle cellule germinali, l'intervento teso a correggere deviazioni o anomalie cromosomiche è da considerarsi lecito, sempre che non intacchi l'integrità del paziente, con il vantaggio di estendere anche ai discendenti il beneficio. Nel caso delle cellule somatiche, l'intervento è lecito quando riguarda aspetti che siano convenienti con il rispetto della persona e i benefici che da esso possono derivare. Ogni intervento che rientri nell'ambito della seconda tipologia deve invece essere considerato illecito alla luce dei principi affermati.

Più articolato è il giudizio che deve essere espresso in merito alla clonazione riproduttiva e terapeutica. La clonazione riproduttiva animale può essere considerata lecita se ha come scopo la ricerca scientifica orientata ad ambiti, come quelli della salute, dell'alimentazione ecc., che risultano effettivamente utili per l'uomo. Essa deve tuttavia essere regolata e vincolata a precise garanzie circa la conservazione della biodiversità, la salvaguardia dell'uomo da eventuali pericoli, lo sfruttamento incontrollato delle specie animali.

La clonazione riproduttiva umana deve essere considerata sempre e in ogni caso illecita, di diritto e di fatto. In linea di diritto, perché viola direttamente il principio di individualità, cui viene ad aggiungersi quello della assoluta indisponibilità della persona umana a essere considerata come un mezzo anziché come un fine, coinvolgendo così anche il principio di identità della specie umana. L'identità umana integralmente considerata è unica, irripetibile e non riducibile alla sua sola componente genetica. Presa per se stessa, l'identità

genetica non esaurisce l'identità biologica, perché fattori ambientali possono indurre eventuali mutazioni. Sicché, dal punto di vista biologico, l'identità personale implica un patrimonio genetico unico, sul quale nessuno ha il diritto di esercitare un dominio. Lo sviluppo della personalità individuale non può poi prescindere dal condizionamento esercitato dall'educazione e dall'ambiente culturale di appartenenza. Il carattere di unicità e integralità dell'individuo umano implica così la sua totale indisponibilità a essere considerato come uno strumento, come evidentemente richiesto dalla clonazione riproduttiva che, di fatto, implicherebbe gravissime e inaccettabili conseguenze. In primo luogo, violando la stessa conoscenza scientifica della natura, la pratica della clonazione riproduttiva umana darebbe origine a una selezione di individui pesantemente compromessi, proprio dal punto di vista genetico, sul piano della lotta per la sopravvivenza; il secondo luogo, la possibilità di selezionare e pianificare delle generazioni di individui su un modello prestabilito, ad esempio solo ed esclusivamente femmine, comporterebbe tra le altre cose, l'annientamento di ogni vincolo di parentela e, quindi, dei rapporti tra gli individui.

La valutazione etica relativa alla clonazione terapeutica, ovvero l'uso delle cellule staminali, si risolve interamente nella risposta all'interrogativo fondamentale inerente alla definizione stessa di inizio della vita umana, dell'essere umano in quanto persona. La questione, che lo si voglia o meno, va ben oltre il responso offerto dalla conoscenza scientifica e abbraccia orizzonti e condizioni di natura eminentemente filosofica, perché verte sulla convenienza delle nozioni di individuo umano e di persona umana.

Sul piano strettamente scientifico è possibile affermare quanto segue:

- l'embrione, cioè l'individuo che si forma in seguito al concepimento, è una realtà totalmente e assolutamente nuova nello scenario della vita. L'embrione è un *nuovo* e *diverso* organismo che presenta un corredo cromosomico proprio di 46 cromosomi, metà da parte maschile, metà da parte femminile;
- l'embrione è un organismo umano perché proveniente dalla fusione delle cellule germinali umane maschili e femminili: appartiene dunque alla specie biologica *Homo sapiens sapiens*;
- l'embrione è un organismo che segue un proprio, esclusivo e autonomo programma, dal momento che possiede il suo peculiare Dna;

- la programmazione, cioè lo sviluppo, manifesta quattro fondamentali caratteristiche.

La prima caratteristica è l'unità biologica del nuovo individuo; tutti i suoi elementi sono infatti perfettamente coordinati e, conseguentemente, si sviluppano come parti di un unico insieme. La seconda caratteristica è quella della coordinazione. In virtù dell'unitarietà del processo di sviluppo tutte le attività sono tra loro coordinate: la moltiplicazione cellulare delle fasi iniziali è integrata. La terza caratteristica è quella della continuità sia sul piano quantitativo sia qualitativo della differenziazione delle funzioni. Non si assiste cioè a nessuna interruzione o rottura traumatica del processo, ma a una continuità che ci porta dall'embrione fino all'uomo adulto. La quarta e ultima caratteristica è quella della gradualità per la quale lo sviluppo unitario e progressivo dell'individuo giunge al suo compimento.

L'interrogativo che si pone a questo punto è cruciale. Questo individuo che appartiene alla specie umana può e deve essere identificato come persona? Rispondere significherà fare appello non solo ai dati che ci offre la biologia, peraltro diversamente interpretabili, ma anche alla conoscenza filosofica e metafisica.

Da una parte, in effetti, i dati scientifici potranno supportare una visione che considera non l'embrione ma, a rigore, lo stesso zigote, un individuo appartenente alla specie uomo che è persona. L'unità e la continuità messe in rilievo implicherebbero necessariamente che, fin dal concepimento, si sia in presenza non di un individuo umano che potenzialmente sarà persona, bensì di un individuo umano che è persona. Insomma, nei diversi stadi:

zigote → *morula* → *blastula* → *embrione* → ...

ci troveremmo di fronte al medesimo e unico soggetto. La persona umana adulta, si concluderà, denota evidentemente una differente maturazione tanto sul piano biologico che psicologico e spirituale rispetto alla vita embrionale, ma ciò non implica affatto una frattura, un salto. Al contrario, e la caratteristica della gradualità lo proverebbe, si ha questa determinata maturità proprio perché essa è avvenuta nell'ambito della stessa identità personale.

Dall'altra parte, in modo analogo, le medesime conoscenze scientifiche potranno essere utilizzate solo ed esclusivamente per afferma-

re la specificità biologica. La vita personale, la soggettività, viene lentamente acquisita e presuppone lo sviluppo delle facoltà superiori, aspetto che, non lo si dimentichi, si sviluppa anche in corrispondenza con la situazione ambientale; soprattutto, tali facoltà non sono presenti sin dall'inizio. Affermare che lo zigote e l'embrione sono già persona, si concluderà, significa supporre surrettiziamente un principio a se stante, l'anima, che presiede sul piano della sostanza la materialità di cui siamo costituiti. In quanto tale, questa sostanza che è già tutta presente e che continuerà a esserlo, deve godere dell'immortalità. La concretezza dell'esperienza ci mostra, al contrario, che la morte è il compimento di un programma che è venuto a imporsi tra mille difficoltà e insidie, a prescindere dal grado di sviluppo della personalità.

Orbene, se l'embrione come tale può essere considerato a pieno titolo un individuo appartenente alla specie umana e, come tale, persona, allora è chiaro che la clonazione terapeutica che utilizza cellule staminali embrionali non può essere considerata lecita, per due ordini di motivi. Anzitutto, perché verrebbe meno il principio che impone di considerare l'individuo umano come fine: la produzione di embrioni sarebbe infatti strumentale all'uso delle loro cellule staminali; in secondo luogo, perché il prelievo delle cellule staminali determina la morte dell'embrione. Se, al contrario, l'embrione non è visto che come un ammasso di cellule, è chiaro che la sua utilizzazione non solo può e deve essere considerata lecita, ma persino auspicabile. Merita tuttavia ricordare che le cellule staminali possono essere ottenute anche dal cordone ombelicale e persino dall'individuo adulto; in questo caso, la clonazione terapeutica può essere considerata lecita fatte salve, naturalmente, le precauzioni inerenti alla tecnica stessa e i benefici che essa comporta.

8. Informazione e partecipazione

Se, sul piano delle problematiche biotecnologiche, la necessità da parte del singolo, del consumatore o del fruitore di disporre di un'informazione il più possibile completa e accessibile si fa sempre più urgente e pressante, di pari passo cresce anche la richiesta di una più diretta partecipazione alle decisioni che il legislatore è chiamato ad assumere nei diversi settori interessati, cioè quelli sanitario, agroalimentare, ambientale ecc. Il soddisfaci-

re la specificità biologica. La vita personale, la soggettività, viene lentamente acquisita e presuppone lo sviluppo delle facoltà superiori, aspetto che, non lo si dimentichi, si sviluppa anche in corrispondenza con la situazione ambientale; soprattutto, tali facoltà non sono presenti sin dall'inizio. Affermare che lo zigote e l'embrione sono già persona, si concluderà, significa supporre surrettiziamente un principio a se stante, l'anima, che presiede sul piano della sostanza la materialità di cui siamo costituiti. In quanto tale, questa sostanza che è già tutta presente e che continuerà a esserlo, deve godere dell'immortalità. La concretezza dell'esperienza ci mostra, al contrario, che la morte è il compimento di un programma che è venuto a imporsi tra mille difficoltà e insidie, a prescindere dal grado di sviluppo della personalità.

Orbene, se l'embrione come tale può essere considerato a pieno titolo un individuo appartenente alla specie umana e, come tale, persona, allora è chiaro che la clonazione terapeutica che utilizza cellule staminali embrionali non può essere considerata lecita, per due ordini di motivi. Anzitutto, perché verrebbe meno il principio che impone di considerare l'individuo umano come fine: la produzione di embrioni sarebbe infatti strumentale all'uso delle loro cellule staminali; in secondo luogo, perché il prelievo delle cellule staminali determina la morte dell'embrione. Se, al contrario, l'embrione non è visto che come un ammasso di cellule, è chiaro che la sua utilizzazione non solo può e deve essere considerata lecita, ma persino auspicabile. Merita tuttavia ricordare che le cellule staminali possono essere ottenute anche dal cordone ombelicale e persino dall'individuo adulto; in questo caso, la clonazione terapeutica può essere considerata lecita fatte salve, naturalmente, le precauzioni inerenti alla tecnica stessa e i benefici che essa comporta.

8. Informazione e partecipazione

Se, sul piano delle problematiche biotecnologiche, la necessità da parte del singolo, del consumatore o del fruitore di disporre di un'informazione il più possibile completa e accessibile si fa sempre più urgente e pressante, di pari passo cresce anche la richiesta di una più diretta partecipazione alle decisioni che il legislatore è chiamato ad assumere nei diversi settori interessati, cioè quelli sanitario, agroalimentare, ambientale ecc. Il soddisfaci-

mento di una simile esigenza, che deve anzitutto prendere le mosse da un'attenta e precisa valutazione scientifica delle cose, può essere conseguito attraverso una serena discussione pubblica degli obiettivi, delle priorità che devono essere individuate come campo di applicazione delle nuove tecnologie, ma anche delle loro eventuali alternative, con il coinvolgimento diretto degli stessi ricercatori.

Ma è in generale il tema dell'informazione e della comunicazione, con i risvolti talvolta inquietanti che esse comportano, che necessita di una nuova e attuale riflessione. Il problema, infatti, non riguarda tanto i contenuti e le modalità attraverso i quali essi vengono comunicati, quanto, piuttosto, questioni strutturali e sistemiche che implicano tematiche relative alla distribuzione delle tecnologie e dei loro sofisticati prodotti. Questi ultimi, a loro volta, chiamano in causa elementi di natura politica ed economica inerenti alla proprietà e al controllo dei mezzi di comunicazione.

Circa il primo aspetto, che comunque merita dovuta attenzione, è opportuno tener presente che la necessità, l'importanza e l'utilità di codici deontologici frutto dell'autoregolamentazione non è certamente una recente e ben gradita novità: il giornalismo ne ha avvertito l'esigenza sin dalle sue origini, offrendo soddisfacenti soluzioni. Un codice etico, cioè una serie di regole che vincolano più o meno strettamente il comportamento di chi informa e confeziona l'informazione, presenta delle caratteristiche particolarmente rilevanti. Anzitutto è qualcosa di tangibile, di concreto, capace di orientare e guidare l'attività. La sua importanza dipende naturalmente dalla più o meno ampia rappresentatività, visto che può limitarsi, come indica l'etimologia del termine "deontologico", a una categoria professionale, ma può estendersi anche al governo di una o diverse nazioni. Si tratta, evidentemente, di una convenzione, una deliberazione che, come tale, non presenta alcun carattere di assolutezza, ma che racchiude un'elevata potenzialità. Tutto ciò rende i codici deontologici particolarmente sensibili e attenti alle inevitabili variazioni e modifiche che il progresso delle tecniche e degli stessi strumenti della comunicazione ha imposto e continua a imporre.

L'assunzione di precise responsabilità nei confronti della verità dell'informazione, del suo essere fundamentalmente libera e al servizio del bene – aspetto quest'ultimo che coinvolge anche il settore privato –, è certo un deciso atto di garanzia e un incoraggiante esem-

pio per una partecipazione attiva e critica, necessario ma non sufficiente. È necessario, perché costituisce indubbiamente un forte e autorevole deterrente di ogni possibile tentazione di ricostruzione della realtà, sia essa elettronica o meno, e della sua alienante sovrapposizione all'esperienza reale. È insufficiente, perché la nuova situazione creatasi alla luce della rivoluzione operata sul terreno della comunicazione, ovvero il fenomeno della globalizzazione, solleva interrogativi etici fondamentali e, con essi, problematiche di carattere politico ed economico. Se l'informazione e la comunicazione costituiscono il veicolo della conoscenza, gestire e controllare gli strumenti idonei alla sua diffusione significa esercitare un potere enorme, in particolare nei confronti di chi a tali tecnologie non può accedere. Anche in questo caso, il principio di equità deve poter assolvere un ruolo importante, ad esempio attraverso iniziative che coinvolgano il necessario sforzo pubblico con l'impresa privata per la formazione e la gestione dei sistemi informatici e della comunicazione; agenzie e istituzioni internazionali potrebbero in tal senso svolgere una funzione di orientamento, definizione delle priorità e garanzia nel medio termine degli accordi stipulati tra nazioni e gruppi interessati o tra le stesse nazioni. D'altra parte, globalizzazione non significa semplicemente, ed erroneamente, omogeneizzazione, riduzione e appiattimento passivo delle diversità culturali su un unico modello. Rendere inefficaci le barriere spaziotemporali significa far emergere le diverse particolarità – con le loro specificità –, che devono assumere un ruolo di rilievo e, conseguentemente, godere di tutela. È in questa direzione che, peraltro, occorre dirigersi per contrastare ogni tentazione monopolistica della conoscenza.

Non si può infine banalizzare o considerare con superficialità il fatto che la cresciuta efficienza con la quale gli attuali strumenti informatici hanno velocizzato il flusso e il controllo dei contenuti informativi pone problemi, anche all'interno di nazioni attrezzate sul piano giuridico e politico, di manipolazione o di uso illegittimo dei dati. L'esigenza di soddisfare in misura tangibile, visibile, il desiderio di sicurezza acclamato dalla stessa società civile, se comprensibile e giustificabile non deve far dimenticare che l'informazione e la comunicazione devono essere al servizio della libertà dell'individuo. È noto come una semplice carta di credito permetta l'accesso a informazioni di vitale importanza per l'individuo; allo stesso modo, chiunque possieda un computer con accesso alla posta elettronica o

a Internet, o semplicemente un telefono cellulare, sa bene di poter essere oggetto di controlli indesiderati. La salvaguardia della *privacy*, e l'istituzione della figura del garante, è sicuramente un atto di grande significato; deve essere garantita sia sul versante delle informazioni circa la nostra identità genetica sia su quello più propriamente culturale e sociale, a garanzia di quella libertà che deve poter essere riconosciuta all'essere umano.

CONCLUSIONE

Al termine del percorso che ci ha visti impegnati nella discussione di alcune problematiche che, per urgenza e importanza, si impongono all'attenzione generale, vi sono alcuni punti fermi su cui crediamo sia utile riflettere serenamente e con impegno, consapevoli della responsabilità delle scelte che siamo chiamati a operare.

Anzitutto, la necessità di approfondire le nostre conoscenze circa i complessi equilibri che regolano il sistema naturale, del quale facciamo parte e con il quale interagiamo sia dal punto di vista esterno – perché agenti che con la loro opera incidono su questa stessa realtà – sia dal punto di vista interno, giacché ciò che siamo dipende anche dall'ambiente in cui viviamo, di cui subiamo l'azione.

La consapevolezza della complessità, in secondo luogo, implica che l'operare umano nei rispetti del sistema della realtà naturale non può non tener conto delle esigenze strutturali della stessa, se intende concretizzare gli sforzi per soddisfare le proprie aspettative. Ciò non esclude affatto il suo primato: al contrario, proprio perché si prende cura di questa realtà, il soggetto umano non può essere considerato alla stregua di qualunque altro organismo vivente o aspetto naturale.

Il riconoscimento del primato dell'uomo impone, in terzo luogo, la necessità di affiancare alla ricerca della conoscenza oggettiva la riflessione sui valori che fondano il comportamento e l'agire umani nel faticoso ma entusiasmante cammino verso la sua piena realizzazione.

CONCLUSIONE

Al termine del percorso che ci ha visti impegnati nella discussione di alcune problematiche che, per urgenza e importanza, si impongono all'attenzione generale, vi sono alcuni punti fermi su cui crediamo sia utile riflettere serenamente e con impegno, consapevoli della responsabilità delle scelte che siamo chiamati a operare.

Anzitutto, la necessità di approfondire le nostre conoscenze circa i complessi equilibri che regolano il sistema naturale, del quale facciamo parte e con il quale interagiamo sia dal punto di vista esterno – perché agenti che con la loro opera incidono su questa stessa realtà – sia dal punto di vista interno, giacché ciò che siamo dipende anche dall'ambiente in cui viviamo, di cui subiamo l'azione.

La consapevolezza della complessità, in secondo luogo, implica che l'operare umano nei rispetti del sistema della realtà naturale non può non tener conto delle esigenze strutturali della stessa, se intende concretizzare gli sforzi per soddisfare le proprie aspettative. Ciò non esclude affatto il suo primato: al contrario, proprio perché si prende cura di questa realtà, il soggetto umano non può essere considerato alla stregua di qualunque altro organismo vivente o aspetto naturale.

Il riconoscimento del primato dell'uomo impone, in terzo luogo, la necessità di affiancare alla ricerca della conoscenza oggettiva la riflessione sui valori che fondano il comportamento e l'agire umani nel faticoso ma entusiasmante cammino verso la sua piena realizzazione.