

XXVII UNIVERSITAT D'ESTIU D'ANDORRA

CIÈNCIA I SOCIETAT

DEL COSMOS
A L'ÀTOM
PASSANT PER LA VIDA

ANNALS

Els textos es publiquen seguint l'ordre i la llengua en què es van pronunciar, llevat del text de Lluís Quintana-Murci, que es va dictar en català i ens ha estat lliurat en francès.

© Govern d'Andorra
Ministeri d'Educació i Cultura
Universitat d'Estiu d'Andorra

Coordinació: Maria Àngels Vilana Carrabina

1a edició: març 2011
ISBN: 978-99920-0-599-6
Dipòsit Legal: AND. 771-2011
Disseny de la coberta: A-Tracció-A
Fotografies conferenciant: Montserrat Altimiras i SFGA
Impressió i maquetació: Impremta Solber

Índex

<i>Presentació</i>	7
<i>Discurs d'obertura</i>	9
<i>Información cuántica para el siglo XXI</i> Juan Ignacio Cirac	15
<i>L'equilibri climàtic del planeta Terra</i> Josefina Castellví Piulachs	29
<i>La beauté dans le cerveau</i> Jean-Pierre Changeux	41
<i>Diversité du génome humain : de nos origines à nos maladies</i> Lluís Quintana-Murci	63
<i>Del microcosmos al macrocosmos, viaje de ida y vuelta</i> Álvaro De Rújula	77
<i>Impacte de la biotecnologia en el món d'avui</i> Magda Marquet Mandicó	87
<i>L'Homme à la recherche de nouveaux mondes</i> Sylvie Vauclair	105
<i>Science, philosophie, religion : quels rapports ?</i> Jean Bricmont	117
<i>Mujer y ciencia: mi propia experiencia</i> Margarita Salas	135
<i>Conclusions de la XXVII Université d'Été d'Andorre</i> Sylvie Vauclair	157
<i>Recherche et applications : du spin de l'électron à nos ordinateurs et téléphones</i> Albert Fert	165

Presentació

El 2010 vam tenir el plaer de dedicar la XXVII edició de la Universitat d'Estiu a la ciència. Durant una setmana –del 30 d'agost al 3 de setembre– i un parell de dies més –el 19 de març i el 16 de setembre–, brillants i entranyables conferencians van anar desgranant el resultat de les seves recerques sobre temes de roent actualitat. Aquells dies ens van permetre viatjar del cosmos a l'àtom i aturar-nos en la vida; vam poder penetrar en el significat del mot *ciència*, que prové del llatí *scientia*, que vol dir 'coneixement', i en el cas que ens ocupa, el coneixement científic.

Efectivament, durant aquesta edició, i com cada any, hem pogut gaudir del plaer d'aprendre, d'ampliar els coneixements, i d'obrir-nos als horitzons del saber. Aquests dies ens van convidar a pensar... Pensar es presenta com una activitat difícil de practicar en una societat on les ocupacions i els centres d'interès són tan nombrosos que sembla que mai no tinguem prou temps per aturar-nos a reflexionar, a pensar en el sentit de la nostra existència. L'agitació del món és tan gran que no tenim temps de meditar! En aquest sentit, voldria esmentar una reflexió de la *Carta sobre l'humanisme* del polèmic filòsof Martin Heidegger: «En la precarietat del món actual es necessita menys filosofia, però una atenció més gran en el pensament, menys literatura però molta més cura en la lletra...». «El pensament», diu més endavant: «està en vies de decreixement cap a la pobresa de seva essència provisional...».

Em consta que durant els dies que va tenir lloc la Universitat d'Estiu es van compartir sabers, experiències, esperances i inquietuds. Desitjo ara que el recull dels textos corresponents a les ponències rememorin aquells moments i donin l'oportunitat d'aprofundir en els continguts i d'esperonar el pensament. Espero que la informació importantíssima que contenen aquests annals es pugui beneficiar del temps suficient per ser pensada i

poder així servir, no solament per incrementar la nostra cultura, sinó també per ajudar-nos en les nostres decisions personals i ciutadanes.

Vull agrair a cada un dels ponents de la Universitat d'Estiu d'Andorra que hagin acceptat la nostra invitació i que ens hagin il·lustrat amb el seu saber; a la nova presidenta i a la moderadora que, amb el seu tacte, professionalitat i dinamisme han marcat aquesta edició. I, òbviament, al públic fidel i curiós del món que els envolta, per la seva fidelitat.

Susanna Vela Palomares
Ministra d'Educació i Cultura

Discurs d'obertura

Distingides autoritats, senyores, senyors, bona tarda a tothom.

Després de cinc anys d'absència a Andorra la Vella, la Universitat d'Estiu retorna a aquest espai renovat del Centre de Congressos, del qual havia hagut de marxar provisionalment precisament perquè el remodelessin. Cal agrair al Comú de Sant Julià de Lòria que l'hagi acollit mentre duraven les obres del Centre de Congressos d'Andorra la Vella. I també al consolat de la capital per haver-nos donat totes les facilitats perquè aquests actes es puguin fer novament aquí en les millors condicions.

I aquest any ho fem sota la batuta, per primera vegada, d'una presidenta, la preuada oceanògrafa, especialista en bacteriologia marina, Josefina Castellví, que també presentarà una ponència. Sylvie Vauclair, reconeguda astrofísica i moderadora dels actes, també en presentarà una. Estic convençut que la ministra d'Educació i Cultura ha traçat una orientació clara a l'hora de programar una manifestació altament femenina. Penso que convenia recordar-ho, ja que en el terreny de les ciències, les dones hi han entrat tard i no sense dificultats. D'aquest tema ens en parlarà llargament la prestigiosa acadèmica Margarita Salas el darrer dia de la Universitat. També vull subratllar la presència de Magda Marquet, enginyera bioquímica andorrana i investigadora arrelada als Estats Units d'Amèrica, on ha creat laboratoris molt valuosos.

Ens sentim particularment honorats, Josefina Castellví, de tenir-la com a presidenta, perquè heu estat una pionera en molts camps: va ser la primera dona científica a dirigir una base a l'Antàrtida que va permetre que Espanya entrés com a membre del Tractat Antàrtic i més endavant del Comitè Científic per la Investigació a l'Antàrtida. Sou, a partir d'avui, la primera presidenta d'aquesta Universitat d'Estiu, popular, oberta a tothom, que ja compta amb vint-i-set anys d'existència. Permeteu-me que us digui que,

quan vau acompanyar Juan Ignacio Cirac, el mes de febrer passat, a la roda de premsa, vau fer molt bé de recordar als mitjans de comunicació que la ciència també és cultura.

És cert que tenim el sentiment que la ciència i la cultura o les humanitats estan separades malgrat que durant molt de temps van formar parella (per als grecs o per a Pascal i Descartes aquests termes anaven estretament units). Així ens ho recorda l'exministre francès d'Educació, Jack Lang, durant una de les seves intervencions a L'Université de tous les savoirs (13 de juny del 2001): «La culture ne saurait se limiter à ce qu'on appelait naguère les "humanités". Il faut se rendre à l'évidence : nous devons de plus en plus compter avec les connaissances scientifiques et techniques. Savoir où nous en sommes avec elles pour vivre avec et grâce à elles. Elles sont aujourd'hui de plus en plus nombreuses, de plus en plus complexes. Voilà pourquoi il est absolument indispensable de créer des espaces et des pratiques pour diffuser la connaissance. Il faut que des forums permanents mettent en contact le monde savant et la société. Le savoir ne doit plus être partagé seulement par quelques initiés...»

I no m'oblido de la resta del brillant planter de la nostra Universitat d'Estiu: el prestigiós neurobiòleg que ha revolucionat aquesta branca de la ciència, Jean-Pierre Changeux; el jove i valuós investigador de la genètica de les poblacions, Lluís Quintana-Murci; el físic teòric reconegut internacionalment, Álvaro De Rújula, i, finalment, el «provocador» físic i assagista, Jean Bricmont.

A l'entorn d'aquesta estimulant composició, graviten altres figures com els dos físics que completen la setmana que encetem: el premi Príncep d'Àstúries 2006, Juan Ignacio Cirac, que vam tenir el plaer d'escoltar el 19 de març passat, i el premi Nobel 2007, Albert Fert, que escoltarem el pròxim 16 de setembre.

És un honor per a Andorra poder acollir totes aquestes personalitats i els estic profundament agraït per haver acceptat la nostra invitació. Una invi-

tació que esdevé un lligam molt més ferm que una simple estada científica o el fet puntual de defensar una conferència durant el temps en què es perllonga la Universitat, sinó una porta oberta al retrobament de persones, al coneixement i a les millores compartides.

Potser perquè Andorra disposa d'unes dimensions geogràfiques reduïdes, se'ns permet acostar-nos d'una altra forma a les persones i mantenir-nos-hi fidels. Potser per això, avui puc recordar breument tres intel·lectuals desapareguts recentment, que van pertànyer a la gran teranyina social que es va construir a l'entorn de cada edició de la Universitat d'Estiu d'Andorra.

Parlo de l'escriptor portuguès, de gran exigència ètica, José Saramago, que el 27 de maig de 1991 (abans d'obtenir el premi Nobel) ens va parlar de *Les contradiccions culturals de la Casa Comuna europea*, del mexicà Carlos Monsiváis, brillant i àcid cronista d'una immensa cultura, que el 4 de setembre del 2002 ens va presentar la ponència *La globalització i les seves definicions* i, finalment, de l'economista i polític, Fred Halliday, que el 27 d'agost de l'any passat, va pronunciar una ponència sobre *The Meanings of Jihad*.

Amb aquests i molts altres records, com el del gran humanista, anticonformista i entranyable amic d'Andorra, José Luís Sampedro, que va inspirar el subtítol d'aquesta Universitat, *Del cosmos a l'àtom passant per la vida*, encetem avui la 27a edició d'una cita anual que exalta el plaer de conèixer i de comprendre, el gust de cercar, de transitar per camins de sabers ben diversos...

La Universitat d'Estiu d'Andorra compta amb un públic fidel, interessat i exigent, que sap acostar-se als diversos i contrastats coneixements per poder aprofundir en temes de roent actualitat. Amb un clar desig de facilitar el cultiu de la reflexió crítica i de les prioritats en les nostres responsabilitats, avui, amb la Universitat d'Estiu, començarem a endinsar-nos en les empremtes que la ciència ha deixat i deixa marcades en el nostre model de societat actual i, per tant, també, en les nostres vides quotidianes.

Acabaré agraïnt una vegada més a tots els científics la seva voluntat de ser aquí per il·lustrar-nos amb els seus coneixements i també a vostès, senyores i senyors assistents, sabedors que sense la seva confiança i fidelitat, actes com aquest no podrien tenir lloc.

Dono per inaugurada la 27a edició de la Universitat d'Estiu d'Andorra.

A totes i a tots, moltes gràcies.

Jaume Bartumeu Cassany
Cap de Govern



Información cuántica para el siglo XXI

Juan Ignacio Cirac

Doctor en ciències físiques, catedràtic de la Universitat Castella-la Manxa entre el 1991 i el 1996; l'any 1996 obté una càtedra a l'Institut de Física Teòrica a la Universitat d'Innsbruck. Director de la divisió teòrica de l'Institut Max Planck d'Òptica Quàntica de Munic des del 2001. Distinguished Research Chair a l'Institut Perimeter del Canadà. Premi Príncep d'Astúries d'investigació científicotècnica, 2006.

Divendres 19 de març

Introducción

A principios del siglo pasado, un físico llamado Planck hizo un descubrimiento que dio lugar a una auténtica revolución científica. Sus ideas resultaron en una teoría que hoy en día llamamos Teoría Cuántica y que ha dado lugar a la mayoría de los desarrollos tecnológicos que se han producido durante el último siglo. Así, el funcionamiento de los láseres, los semiconductores (con los que se construyen equipos informáticos, por ejemplo), los sistemas electrónicos, los reactores nucleares, etc., está basado en la teoría cuántica. En particular, se puede decir que gran parte del hecho de que nos encontremos en la «era de la información» se lo debemos a esta teoría.

Además de todas estas aplicaciones tecnológicas, esta teoría introdujo una nueva forma de ver la naturaleza, algo que hasta hace poco tiempo llamó más la atención de filósofos que de físicos. Según la mecánica cuántica, las propiedades de los objetos no tienen por qué estar bien definidas mientras no los observamos. Este raro fenómeno se manifiesta especialmente en los objetos microscópicos. Por ejemplo, si tenemos un átomo o una molécula y nos fijamos en uno de los electrones que la componen, es posible que se encuentre girando en una órbita alrededor del núcleo, de la misma forma que los planetas en el sistema solar giran alrededor del sol. De acuerdo con la mecánica cuántica, el electrón también puede estar en una «superposición» de dos o más órbitas; esto es, la órbita en la que está no está bien definida. Sólo cuando observamos el átomo (normalmente enviándole luz) la órbita queda determinada. Aunque parezca extraño, no es que el electrón se esté moviendo caóticamente entre dos órbitas, sino simplemente que su trayectoria no existe, no está bien definida, y sólo al observar aparece esa propiedad. Lo mismo pasa con los fotones y otras partículas microscópicas.

Según vamos considerando objetos mayores (moléculas mayores, compuestos formados por muchas moléculas, en definitiva, objetos macroscópicos), este fenómeno desaparece progresivamente, y los objetos tienden a adquirir las propiedades incluso cuando no los observamos. Así, los planetas se mueven en órbitas bien definidas, o los coches tienen trayectorias precisas.

El demostrar que existen superposiciones parece imposible, pues para obtener cualquier resultado siempre tendremos que observar, y entonces... desaparece la superposición. En 1964, sin embargo, un físico llamado Bell vio una forma de demostrar experimentalmente la existencia de las superposiciones cuánticas en objetos microscópicos evitando todos los obstáculos. La idea era utilizar estados entrelazados; esto es, superposiciones cuánticas de dos o más objetos. Por ejemplo, podemos tener dos átomos con sus electrones respectivos en una superposición de dos posibles situaciones (la primera en el que los dos electrones están en la primera órbita y la segunda con ambos electrones en la segunda órbita de cada uno de los átomos). Si ahora observamos el primer átomo y vemos que el electrón está en la primera órbita, entonces sabemos que si observásemos el segundo átomo deberíamos encontrarlo en el mismo estado. Es decir, al definir la propiedad en uno de los objetos, también queda definida en el segundo sin necesidad de que lo observemos o que incluso interaccionemos con él. Bell mostró cómo haciendo medidas en pares de objetos en estados entrelazados sería posible demostrar la existencia de superposiciones cuánticas, pues los resultados (las correlaciones) serían completamente incompatibles con los de cualquier teoría en la que las propiedades de los objetos estuvieran definidas antes de realizar las medidas.

Las ideas de Bell no calaron muy profundamente en la sociedad científica, pues por aquel entonces era imposible aislar uno o dos átomos (o fotones) y realizar experimentos con ellos. De hecho, la mecánica cuántica parecía ser una teoría que daba muy buenas predicciones estadísticas, pero se pensaba que la naturaleza de los estados de superposición era algo que nunca se podría llegar a demostrar. Sin embargo, en los años 70 hubo un gran avance experimental que permitió aislar átomos y poder generar fotones uno a

uno. Se realizaron entonces los primeros experimentos sugeridos por Bell y llegaron a la sorprendente conclusión de que, en efecto, la naturaleza es como predice la mecánica cuántica y, por tanto, las propiedades de algunos objetos no están definidas hasta que las observamos. Estos experimentos se repitieron cuidadosamente en varias ocasiones llegando siempre a la misma conclusión.

En los años 80, algunos científicos empezaron a especular con la posibilidad de utilizar esta extraña propiedad de la naturaleza para hacer cosas extraordinarias. La mecánica cuántica nos da unas nuevas reglas de juego con las que sería posible construir dispositivos que realicen tareas que, con las reglas antiguas, serían imposibles. En efecto, las superposiciones cuánticas pueden dar lugar a una nueva revolución dentro del mundo de la comunicación y de la computación. En particular, pueden ser utilizados para el intercambio de mensajes secretos (criptografía cuántica) o para crear algoritmos matemáticos que permitirían resolver problemas que, hoy por hoy, parecen irresolubles (computación cuántica). De hecho, el avance espectacular que ha experimentado la tecnología nos permite hoy en día no sólo aislar objetos microscópicos, sino también manipularlos y controlarlos. Así, en estos momentos existen varios grupos científicos intentando construir ordenadores y otros dispositivos para la comunicación basados en las leyes de la mecánica cuántica.

Ordenadores cuánticos

De manera general, al realizar un cálculo con un ordenador tenemos que introducir un *input* (un número o una palabra) que, tras un proceso físico, se convierte en un *output*, el resultado deseado. En los ordenadores que tenemos a nuestra disposición, este proceso físico está relacionado con el movimiento de electrones dentro de algunos materiales. Estos fenómenos, aunque tienen su explicación dentro del marco de la mecánica cuántica, no utilizan explícitamente el principio de superposición cuántico. Por eso, a estos ordenadores se le suele llamar ordenadores clásicos. Un ordenador

cuántico sería aquél en el que el proceso físico está basado en el principio de superposición. Básicamente, esto significa que, además de poder introducir y obtener ciertos números como inputs y outputs, también podemos utilizar superposiciones de números. Esta posibilidad hace que un ordenador cuántico sea mucho más potente que los que tenemos hoy en día.

Los ordenadores (clásicos) son cada vez más potentes y hoy podemos hacer con ellos cosas que resultaban inimaginables hace veinte años. Continuamente se están produciendo descubrimientos que permiten hacer circuitos electrónicos más pequeños, a la vez que más rápidos. La potencia de un ordenador cuántico, sin embargo, no tiene nada que ver con estos descubrimientos, sino con que la mecánica cuántica proporciona «nuevas reglas de juego» (superposiciones) para poder realizar cálculos. Esta afirmación se puede ilustrar con un ejemplo. Imaginemos que las leyes que conocemos sólo nos permitiesen sumar como hacen los niños pequeños; es decir, contando. Así, si quisiéramos sumar $2+3$ tendríamos que dibujar dos palitos, luego otros tres, y luego contarlos para obtener 5. Con estas leyes, sería imposible sumar números grandes, por ejemplo, un millón más un millón. Si tuviésemos un ordenador que cuenta muy rápido, tal vez podríamos realizar esta suma en un par de minutos, pero sería imposible sumar dos veces mil millones. Para poder realizar esta suma en un par de minutos, los ordenadores deberían ser mil veces más rápidos. Si quisiéramos sumar dos billones, deberían ser un millón de veces más rápido, mientras que si quisiéramos sumar dos números de mil cifras, probablemente nunca podríamos construir un ordenador que realizase esta tarea. Sin embargo, si alguien descubriera una nueva ley que permite sumar los números como hoy sabemos hacer (escribir uno debajo del otro, y sumar cifra a cifra), el tiempo necesario para sumar dos números de mil cifras sería sólo mil veces mayor que el necesario para sumar $2+3$, con el mismo ordenador. Pues bien, la Mecánica cuántica permite hacer esto mismo con otros problemas para los cuales sólo existen métodos lentos para resolverlos.

El input en un ordenador se codifica normalmente en bits; esto es, en ceros y unos. En un ordenador cuántico también codificamos la información en bits

cuánticos (llamados también *qubits*). Por ejemplo, el 0 puede representar un átomo con un electrón en la primera órbita y 1 en la segunda. Si utilizamos el principio de superposición también es posible tener el electrón en una superposición cuántica del 0 y el 1. Si evaluamos cualquier función f sobre estos inputs, los resultados serán $f(0)$, $f(1)$ o una superposición de estos dos resultados, respectivamente. En este último caso tenemos que con una sola ejecución el output contiene información sobre el resultado de la función evaluada en 0 y 1. Es como si tuviésemos varios procesos corriendo a la vez en el mismo ordenador. Si tenemos 100 qubits, podemos tener pues muchísimos procesos corriendo en paralelo... en un solo ordenador. Esto muestra que un ordenador cuántico puede hacer lo mismo que uno clásico, y más. De hecho, utilizando esta propiedad de la mecánica cuántica se han podido encontrar algoritmos con los cuales se podrían resolver problemas de una manera mucho más eficiente que sin utilizarla. Un ejemplo es el problema de la factorización, en donde el objetivo es, dado un número, encontrar otros dos de tal manera que si los multiplicamos obtengamos dicho número. Con los ordenadores actuales (clásicos) es fácil factorizar un número de un par de cifras, pero es imposible construir un ordenador tan rápido que pueda factorizar un número de mil cifras. La razón es que los algoritmos que funcionan en nuestros ordenadores tienen un tiempo de ejecución que escala prácticamente exponencialmente con el número de cifras del número que queremos factorizar. En un ordenador cuántico, el esfuerzo en factorizar un número con mil cifras sería comparable con el de factorizar uno de pocas, ya que en el año 1994 Peter Shor descubrió un algoritmo cuántico en el que el tiempo de ejecución escala polinómicamente con el número de cifras. Es interesante apuntar que el hecho de que los ordenadores actuales no sean capaces de factorizar números grandes se utiliza para enviar información secreta (entre bancos, por Internet, etc.) con la seguridad de que nadie la podrá descifrar (pues para ello tendría que factorizar un número grande). Así que con un ordenador cuántico todos estos métodos de comunicación dejarían de ser seguros. Por otro lado, Lov Grover en 1996 introdujo un algoritmo cuántico que permite buscar en bases de datos de una manera mucho más eficiente que con los algoritmos clásicos.

Los componentes básicos de un ordenador cuántico son los llamados bits cuánticos o qubits. Estos son sistemas físicos de dos niveles que pueden encontrarse en el estado 0, 1, o en cualquier superposición de estos dos. Los inputs y outputs se pueden almacenar en qubits; por ejemplo, si tenemos 4 qubits y queremos introducir el número 11 sólo tenemos que preparar a los qubits en los estados $|1\rangle|0\rangle|1\rangle|1\rangle$, ya que 11 en binario es igual a 1011. También es posible preparar un estado superposición, como por ejemplo el $|1\rangle|0\rangle|1\rangle|1\rangle + |0\rangle|1\rangle|1\rangle|0\rangle$. Estos estados de superposición de varios qubits se llaman entrelazados y juegan un papel esencial en el algoritmo de factorización de Shor. Una computación cuántica es una operación que transforma el estado de los qubits. Al igual que en el caso clásico, existe un conjunto de puertas lógicas cuánticas universales, de tal forma que toda computación se puede obtener concatenando estas puertas en los distintos qubits.

Si los ordenadores cuánticos son tan interesantes, ¿por qué no se ha construido ninguno todavía? El problema está en que las superposiciones cuánticas son extremadamente frágiles ya que cualquier agente externo actúa como un observador, y hace que sus propiedades queden determinadas (dejan de ser superposiciones). Así que para poder generarlas es necesario tener un objeto completamente aislado de todo lo demás. Tecnológicamente, es imposible aislar completamente objetos grandes pues siempre hay aire, luz, etc. que interaccionan con ellas. Esta es la razón por la cual no se pueden construir superposiciones con objetos macroscópicos. Sin embargo, algunos objetos microscópicos, como los átomos, si se pueden aislar (y de hecho con ellos se pueden crear superposiciones). Por el momento, conocemos muy pocos sistemas físicos que cumplan todos los requisitos necesarios para poder construir con ellos un ordenador cuántico. El impedimento más importante está relacionado con la necesidad de encontrar un sistema cuántico que esté lo suficientemente aislado, pero en el cual existan las interacciones adecuadas; en particular, las necesarias para llevar a cabo las puertas lógicas. Existen tres tipos de sistemas físicos que cumplen, al menos, la mayoría de los requerimientos:

Óptico-cuánticos: los qubits se almacenan en los estados internos de varios átomos, y las puertas lógicas se obtienen manipulándolos mediante luz láser. Son sistemas muy limpios, en el sentido en que en ellos es posible observar fenómenos cuánticos muy claramente. De hecho, con ellos se han creado estados con analogías a los de la paradoja del gato de Schrödinger, se ha medido el efecto Zeno cuántico, se han llegado a condensar mediante enfriamiento láser, etc. Además, estos sistemas son los utilizados para crear relojes atómicos, y con ellos se realizan las medidas de mayor precisión que conocemos. Actualmente, en varios laboratorios de Europa (en un Instituto Max Plank de investigación alemán, y en las universidades de Innsbruck y Oxford) y de Estados Unidos (en los centros de investigación de Los Álamos y NIST) se han conseguido construir ordenadores cuánticos con unos pocos átomos que se atrapan en trampas electromagnéticas y se enfrían con la ayuda de láseres para que se queden parados. Es de esperar que en los próximos años se puedan llegar a manipular unas cuantas decenas de qubits.

Sólidos: Existen varias propuestas para construir ordenadores cuánticos con superconductores, puntos cuánticos o sistemas magnéticos. En ellos los qubits se almacenan, por ejemplo, en pares de electrones (pares de Cooper) en un lado u otro de una unión Josephson, o bien, en electrones en distintos estados de los puntos cuánticos. Por ahora se han podido aislar un par de qubits y realizar puertas lógicas en varios laboratorios de todo el mundo. La mayor dificultad en estos casos es el aislamiento, dado que en un sólido es difícil evitar a las interacciones con otros átomos, impurezas, fonones, etc. Sin embargo, estos sistemas tienen la gran ventaja de que si algún día funcionan, será más sencillo construirlos a escalas mayores.

Moléculas: En este caso los qubits están almacenados en los átomos de una molécula y las manipulaciones se producen con la técnica de resonancia magnética nuclear. En un principio se pensó que esta tecnología era muy apropiada para implementar ordenadores cuánticos, ya que no es necesario enfriar las moléculas (lo que presentaría una gran dificultad en la práctica). De hecho, se han hecho varios experimentos por todo el mundo con hasta

siete qubits. Sin embargo, recientemente se ha puesto en duda que estos sistemas en realidad tengan algo que ver con la computación cuántica pues la señal que se obtiene en la medida decrece exponencialmente con el número de qubits.

Criptografía cuántica

Es también posible utilizar las superposiciones cuánticas para encriptar mensajes. En particular, estas superposiciones pueden ser usadas para distribuir claves secretas con las que más tarde se pueden codificar y decodificar mensajes secretos mediante la técnica del OTP («one-time pad»). Los primeros en darse cuenta de este hecho fueron C. Bennet y G. Brassard en 1984 cuando propusieron un protocolo para distribuir claves secretas en el que el remitente envía aleatoriamente uno de los cuatro estados $|0\rangle, |1\rangle, |0\rangle + |1\rangle$ o $|0\rangle - |1\rangle$ y el que los recibe realiza una medida de dos posibles. Si alguien intenta interceptar la comunicación, destruirá la superposición, y por tanto será detectado. Un segundo protocolo fue introducido por A. Ekert en 1991 y está basado en la utilización de estados entrelazados que también se destruyen si alguien intenta detectarlos.

Los experimentos en este campo están mucho más avanzados que en el de los ordenadores cuánticos, y ya es posible enviar mensajes secretos entre lugares próximos. El primer experimento de criptografía cuántica se realizó en IBM en una distancia de 30 cm. Actualmente, grupos experimentales en Ginebra (Suiza), Los Alamos (EEUU), Viena (Austria), Malvern (Gran Bretaña), Munich (Alemania), etc. han conseguido llegar a distancias del orden de 70 km. Es de esperar que en el futuro próximo se llegue a 100 o 200 km. En todos estos experimentos, los estados cuánticos se almacenan en fotones que se envían a través de fibras ópticas. El principal obstáculo para poder llegar a distancias mayores es la absorción de los fotones en la fibra óptica. Para solucionar este problema se están desarrollando sistemas de comunicación con satélites y repetidores cuánticos, que amplificarían los estados entrelazados. Existen hoy en día varias empresas que comer-

cializan este método de comunicación secreta. La importancia de la criptografía cuántica sería mucho mayor en el caso en que existieran ordenadores cuánticos, pues entonces los métodos tradicionales (clásicos) de criptografía no serían seguros y sólo la criptografía cuántica sería capaz de ofrecer una solución completamente satisfactoria.

En definitiva, la mecánica cuántica, además de darnos una nueva visión sobre la naturaleza, permite obtener efectos que pueden ser aprovechados en el campo de la comunicación y de la computación. Estos efectos están directamente relacionados con el principio de superposición. En particular, el hecho de que un computador pueda aceptar inputs, producir outputs y manejar superposiciones de estados puede ser utilizado para resolver problemas de una manera más eficiente. La puesta en práctica de estas ideas es, sin embargo, muy complicada. Los primeros experimentos sobre computación cuántica están teniendo lugar. Sin embargo todavía es muy pronto para saber cuándo tendremos ordenadores cuánticos. Lo que sí está claro es que si somos capaces de construirlos, podremos realizar tareas que nunca podríamos realizar con ordenadores clásicos. En criptografía, por el contrario, los experimentos están ya muy avanzados y es posible incluso comprar un sistema criptográfico cuántico. Más aún, es fácil predecir que muchas de las aplicaciones del futuro en el campo de la comunicación y de la computación estarán basadas en el principio de superposición cuántico y en la existencia de los estados entrelazados.

Bibliografía

- A. Galindo, «Quanta e información», *Revista Española de Física*, **14**, 30 (2000)
- J. I. Cirac, «Quanta y computación», *Revista Española de Física*, **14**, 48 (2000)
- C.W. Bennett y D. DiVincenzo, «Quantum Information and Computation», *Nature*, **404**, 247 (2000)
- J. I. Cirac and P. Zoller, «New frontiers in Quantum Information with atoms and ions», *Phys. Today* **57**, 38 (2004)
- J. I. Cirac and P. Zoller, «How to manipulate cold atoms», *Science* **301**, 176 (2003)



L'equilibri climàtic del planeta Terra

Josefina Castellví Piulachs

Doctora en biologia, oceanògrafa especialitzada en bacteriologia marina. Investigadora a l'Institut de Ciències del Mar del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC). Cap de la Base Antàrtica Espanyola (BAE) del 1989 al 1994. Membre de l'European Committee on Ocean and Polar Sciences (ECOPS). Premi Nacional de la Societat Geogràfica Espanyola (1998), Creu de Sant Jordi de la Generalitat de Catalunya (2003) i Gran Creu d'Alfons X el Savi (2007). Presidenta de la XXVII Universitat d'Estiu d'Andorra.

Dilluns 30 d'Agost

Les diverses unitats geogràfiques, tant de terres emergides com de masses d'aigua, i els ecosistemes que cadascuna desenvolupa, formen part d'una sola unitat: la natura. Totes les seves estructures, ja siguin vives o inertes, estan interrelacionades amb un objectiu final: mantenir l'equilibri natural.

Quan ens endinsem en l'estudi de la natura ens adonem que és un sistema continu i interrelacionat, de manera que qualsevol fenomen que es produeixi en una part es transmet directament o indirectament a la resta del sistema. Això fa que el conjunt sigui tan complex que dificulta el seu coneixement a causa de la xarxa d'interconnexions que s'estableixen.

L'home, en el seu delit d'ordenar l'estudi dels sistemes naturals, ha arribat a definir una sèrie de compartiments estancs que li permeten el coneixement sistemàtic del seu contingut. Aquesta estructura no s'ajusta a la realitat de la natura però permet l'estudi profund i amb molt detall de cadascuna de les seves parts. D'aquesta manera ens anem aproximant a un coneixement estàtic d'un sistema que està contínuament evolucionant, però encara estem lluny de la comprensió del funcionament de la biosfera.

La Terra no està en equilibri físic. Depèn de la biosfera per mantenir les condicions especials que la vida requereix. El sòl, l'aigua i l'atmosfera han anat evolucionant durant milions d'anys mitjançant l'activitat de la biosfera. La Terra es veu envoltada per una xarxa vital formada per éssers vius, l'activitat dels quals condiciona i és capaç de variar les característiques físiques i químiques del medi on es desenvolupen. Això fa que es mantinguin els cicles d'energia i matèria orgànica que estan en constant transformació. En realitat l'home viu en un medi que és creat i mantingut en cada moment per la totalitat d'organismes que formen la biosfera.

Parlar de natura és parlar d'equilibri. Totes les activitats de la biosfera estan incloses dins d'un marc d'equilibri general i el resultat final és que la suma de la respiració de tots els éssers vius és igual a la producció primària elaborada pels vegetals. És a dir, que l'anhídrid carbònic produït durant la respiració s'equilibra amb l'oxigen produït per la funció clorofíl·lica.

Cada espècie, incloent-hi la humana, té un paper determinant dins el sistema natural que no és constant en el temps sinó que evoluciona en harmonia amb l'evolució que tingui el mateix sistema. Es tracta d'un equilibri dinàmic.

Per mantenir aquest equilibri entre tots els éssers vivents i el mateix planeta és necessari que la temperatura ambiental oscil·li entre uns intervals que siguin compatibles amb la vida. A temperatures molt altes, on es produeix la desnaturalització de les proteïnes, o a temperatures molt baixes, on els sistemes enzimàtics són inoperants, la vida no es pot mantenir. Els elements essencials que procuren l'equilibri climàtic de la Terra són l'atmosfera i els oceans. Ambdós són fluids d'una densitat diferent que actuen com embolcalls del planeta i, gràcies a la seva acció, la Terra manté una estabilitat tèrmica.

La Terra absorbeix radiació solar i, a la vegada, emet energia cap a l'espai, però aquestes dues accions no són homogènies segons els llocs que considerem. A les proximitats de l'equador, l'energia radiant que rep la Terra és molt superior a la que emet i això es manifesta amb un escalfament de l'aigua dels oceans i de l'atmosfera. En canvi, a les regions polars passa el contrari: la Terra emet més energia que la que rep del sol. Aquestes diferències de comportament a latituds diferents produeixen moviments dels fluids en direcció vertical i horitzontal que, a més, estan modificats pel moviment de rotació de la Terra. La resultant és una tendència a l'homogeneïtzació de la temperatura entre llocs que han rebut quantitats d'energia molt diferents.

El fet que la calor específica de l'aigua sigui molt elevada fa que els oceans tinguin una gran capacitat de retenir l'energia calorífica rebuda des del sol,

sobretot tenint en compte que el 75% de la superfície del planeta està coberta pels oceans. El seu poder calorífic és unes mil vegades el de l'atmosfera, de manera que suposa un gran tampó que amorteix els canvis de temperatura. Més endavant veurem quins mecanismes desenvolupen els oceans per transferir l'energia retinguda a altres zones, incloses les terres emergides.

La relació de contacte íntim existent entre l'oceà i l'atmosfera és determinant per a una sèrie de fenòmens que tenen com a factor comú la transferència d'energia. Les masses d'aire experimenten modificacions notables quan passen per damunt de l'aigua de mar. Les parts inferiors de masses d'aire humides procedents dels tròpics es refreden quan viatgen cap als pols per sobre d'aigües fredes i produeixen núvols baixos i boires abundants. Al contrari, masses d'aire fredes que provenen dels pols i viatgen vers l'equador, s'escalfen i es carreguen d'humitat quan travessen zones d'aigües calentes. Aquest escalfament es tradueix en un moviment ascendent de les masses d'aire que produeix núvols i pluges.

Sense cap dubte els oceans formen la part fonamental del cicle hidrològic mundial que, sota l'efecte de l'energia solar, produeix cíclicament evaporació, precipitació, retenció d'humitat, etc. i en la qual hi ha la base del sistema climàtic del planeta.

Els oceans, lluny d'estar constituïts per un gran cúmul d'aigua uniforme, tenen una estructura ben definida i molt complexa que, malauradament, encara no coneixem del tot. Masses d'aigua ben diferenciades per la seva composició química i característiques físiques circulen pels espais oceànics sense barrejar-se amb altres i transporten en el seu si nutrients i energia que són fonamentals per a la síntesi de matèria orgànica que, en definitiva, és el primer graó de la cadena alimentària del sistema.

Entre molts altres mecanismes de transport centrarem la nostra atenció en els corrents marins com a integradors d'un sistema d'interacció oceà-atmosfera, que intervé de manera decisiva en l'equilibri climàtic del planeta.

Hi ha corrents que són induïts pel vent. El seu abast és únicament superficial i la seva existència està íntimament lligada a la força del vent que desplaça la pel·lícula superficial d'aigua. La velocitat d'aquests corrents disminueix amb la profunditat i la seva direcció té una desviació cap a la dreta a l'hemisferi nord a causa de l'efecte de rotació del planeta (efecte Coriolis).

També hi ha corrents originats per altres causes com són les diferències de temperatura i salinitat de les aigües. Són els corrents termohalíns. Aquests corrents es caracteritzen per ser relativament lents però comporten el desplaçament de grans volums d'aigua entre masses oceàniques de diverses densitats. El seu origen està relacionat amb les diferències d'energia solar i d'evaporació que es produeixen a les zones equatorials. La massa d'aigua que conforma el corrent desplaça quantitats molt importants d'energia tèrmica que, al llarg del seu recorregut, es va dissipant en favor de zones més fredes. El conjunt de l'acció d'aquests corrents causa un transport d'energia calorífica des de les zones tropicals, de màxima insolació, vers les zones polars que reben un mínim d'energia.

Un exemple típic d'aquest tipus d'acció és el corrent del Golf, que forma part del gran cinturó de corrents mundials. L'escalfament de l'aigua superficial, que manté una baixa densitat, s'origina al Golf de Mèxic i, com un riu, travessa les masses oceàniques de l'Atlàntic Nord i passa fregant les costes d'Escandinàvia que, a causa de la seva latitud, són terres fredes. L'energia calorífica que transporta aquest corrent es va dissipant i transferint a les regions per les quals transcorre. Això fa que el clima sigui més benigne del que li correspondria pel lloc geogràfic que ocupa. A latituds de 60° N hi ha grans boscos i activitats agrícoles productives que han permès l'assentament de civilitzacions pròspères i l'establiment de ciutats com Oslo, Estocolm, Hèlsinki i d'altres que no trobem, a les mateixes latituds, a l'hemisferi sud.

El refredament del corrent del Golf a les latituds altes provoca un augment de la densitat de l'aigua que fa que no es pugui mantenir a la superfície i es

desplomi en forma de cascada cap al fons fins que troba l'anomenat *nivell de compensació*, és a dir, el nivell per sobre del qual l'aigua és menys densa i per sota del qual l'aigua és més densa. Aquí segueix un llarg recorregut en profunditat que porta el corrent cap a l'Atlàntic sud i l'Índic i tanca el bucle tornant al Golf de Mèxic. La forta insolació torna a disminuir la densitat de l'aigua i la fa emergir cap a la superfície.

El *motor* que mou aquesta cinta transportadora va lligat a la força de caiguda de l'aigua a la part més septentrional de l'Atlàntic nord. Com més intens és el refredament i, per tant, l'augment de la densitat de l'aigua, la caiguda cap al fons és més ràpida i la força d'arrossegament de tot el corrent augmenta. Per tant, la persistència del corrent del Golf depèn del fred que faci a les latituds altes de l'hemisferi nord. Davant un canvi climàtic com el que vivim actualment i que es caracteritza per l'escalfament de la Terra, el corrent del Golf també es veu afectat. Els especialistes en dinàmica d'aigües ja han detectat una desacceleració d'aquest corrent. Les zones àrtiques, sota la influència del canvi climàtic, han moderat les temperatures disminuint el poder de refredament de l'aigua i, per tant, la caiguda cap el fons es fa a menys velocitat i tot el mecanisme s'alenteix.

Actualment es coneixen relativament bé els corrents oceànics quant a la seva existència, el seu recorregut i, fins i tot, pel que fa referència al volum d'aigua transportat. El gran problema és el coneixement de les causes i la variabilitat, que poden ser l'origen d'alteracions climàtiques no sols al mar sinó també en terres emergides.

S'està fent un esforç considerable de coordinació internacional tant pel que fa referència a les observacions de satèl·lit com pel que fa a la instal·lació de boies en tots els oceans que obtenen dades indispensables per a l'estudi del fenomen.

Tots aquests processos posen de manifest l'estreta relació existent entre l'oceà i l'atmosfera, però val la pena insistir en la influència que hi ha entre els fenòmens oceànics i la climatologia de les terres emergides.

A més dels corrents marins, la natura ha desenvolupat altres mecanismes relacionats amb els oceans que tenen efectes amb conseqüències directes sobre la regulació de l'energia que ens arriba del Sol.

L'existència de zones de la superfície marina que temporalment es gelen té la seva transcendència dins l'encaix de l'equilibri climàtic del planeta Terra. Majoritàriament, per la seva extensió, les regions polars són les que juguen el paper més important i, concretament, el major efecte està lligat al pol sud.

L'Oceà Glacial Antàrtic, format per la unió dels oceans Atlàntic, Pacífic i Índic, representa el 20% de la superfície aquosa del planeta. Al centre d'aquesta gran massa d'aigua apareix l'Antàrtida, amb un aïllament total pel que fa referència a altres terres emergides. Aquesta particular disposició li confereix característiques climàtiques singulars.

La imatge de l'Antàrtida, vista des de l'espai, canvia segons l'època de l'any. A l'hivern els seus 14 milions de km² resten empresonats dins un anell del gel marí (banquisa) que, sense solució de continuïtat amb el gel continental, es perllonga mar endins en amplituds mitjanes de 1.000 km. En aquesta situació hivernal la superfície del gel augmenta fins a uns 20 milions de km². Aquest creixement de la superfície sòlida, que aparentment sembla banal, té una elevada influència ecològica.

A causa de la concentració salina de l'aigua de mar, la seva congelació es produeix al voltant de -2,5 °C. Pel fet que l'aigua té la característica que la seva màxima densitat no correspon amb el punt de congelació, quan baixa la temperatura es va congelant la superfície del mar i assoleix gruixos d'alguns metres que, en realitat, actuen d'aïllant tèrmic, ja que el gel és un molt mal conductor de la calor. D'aquesta manera, la flora i la fauna marina no es veuen afectades pels grans freds hivernals i segueix el seu cicle biològic en un ambient que mai es troba per sota dels -2,5 °C. Les diverses espècies viuen en aquest ambient temporalment protegides dels seus depredadors naturals. Per sota del gel, la il·luminació és molt tènue però suficient perquè

les algues adaptades a aquestes condicions de vida puguin continuar els seus cicles vitals.

En arribar la primavera, la banquisa s'aprima per fusió de l'anell de gel i es trenca en trossos més o menys grans que es deixen emportar pels corrents fins que es fon del tot. Les espècies adherides a aquestes plataformes es van lliurant al medi, a mesura que la fusió del gel avança, i segueixen el seu cicle en el medi líquid.

A l'estiu, la imatge que ofereix el conjunt del continent és la de reducció de la superfície gelada, de manera que el perímetre és el de les costes de la terra emergida i el de les barreres perpètues que no es fonen mai i que representen el 10% de la superfície antàrtica.

Des del punt de vista energètic, aquesta regió és la més activa del planeta. Cada any, en aproximadament 100 dies, es produeix la formació i després la fusió d'uns 20 milions de km² de gel. Vegem les conseqüències que té l'existència d'aquesta «taca blanca» centrada al pol sud en l'equilibri climàtic del planeta.

Durant el moviment d'expansió hivernal, al mateix temps que el creixement de la superfície gelada, es produeix un refredament progressiu del continent en un procés que s'alimenta a si mateix. D'una part el sistema perd energia, ja que l'increment de la superfície blanca, la puresa de l'atmosfera i la pobresa de vapor d'aigua provoquen un augment de la reflexió de l'energia solar. D'altra banda, en augmentar el diàmetre del casquet gelat, les regions centrals cada vegada són més lluny del focus calorífic representat per les aigües subantàrtiques dels oceans que han estat escalfades a les zones tropicals. Depenent de l'estació de l'any que es consideri, aquest fenomen de refredament pot ser més o menys exagerat però, en qualsevol cas, el balanç energètic d'aquesta regió del planeta és sempre negatiu. Com a conseqüència d'aquest fet es produeix, de manera constant, un desplaçament d'energia des de les baixes latituds que influeix de manera decisiva en la regulació tèrmica del planeta i, en definitiva, en les seves condicions climatològiques.

Els intercanvis d'energia entre l'oceà i l'atmosfera estan estretament lligats a l'extensió de la coberta de gel marí de manera que la seva dinàmica és un element essencial en el sistema de regulació del clima.

Com a conseqüència d'un augment general de temperatura es pot produir una reducció de l'extensió de la superfície gelada del mar que envolta el continent antàrtic. La disminució de la superfície de reflexió es tradueix en un augment de l'absorció d'energia. D'altra banda, en aquesta situació, una superfície líquida dels oceans més gran queda exposada al contacte atmosfèric i augmenten, per tant, la pèrdua de calor, l'evaporació i la dissipació d'anhídrid carbònic que els processos biològics han generat als ecosistemes marins.

La dinàmica de les masses d'aigua oceànica també es veu influïda pel balanç entre l'energia rebuda i la reflectida. Sobre el continent antàrtic sovint es produeixen inversions tèrmiques de l'atmosfera. En aquestes situacions la massa d'aire fred i dens es trasllada des del centre a les parts baixes del continent seguint les valls de les glaceres i accelerant-se a mesura que arriba a cotes més baixes. Aquesta és la formació dels vents catabàtics. Quan aquests vents arriben a la costa bufen cap al mar i produeixen un refredament considerable de l'aigua superficial, que augmenta bruscament de densitat i es desploma cap al fons fins a trobar el seu nivell de compensació.

Aquest fenomen es produeix a tots els mars que envolten l'Antàrtida, però al mar de Weddell adquireix grans proporcions i origina «l'aigua antàrtica profunda» que, en forma de corrent marí, s'integra en el circuit global de corrents termohalins del planeta. Aquesta aigua, de característiques físiques i químiques molt singulars, es pot trobar a diverses profunditats a tots els oceans del món, fins i tot a l'hemisferi nord.

El coneixement del medi ambient del planeta i dels fenòmens a gran escala va lligat a l'estudi de processos multidisciplinaris que es desenvolupen en el sistema «atmosfera-terra-oceà» i que tenen com principals protagonistes les interaccions entre les diverses fases. En l'estudi d'aquests processos s'ha

avançat prou per saber que la simplificació excessiva i el reduccionisme no ens porten al coneixement de l'essència del procés sinó a visions distorsionades.

En la gestió mediambiental hem d'avançar vers un plantejament nou, més científic, global i multidisciplinari que, progressivament, es recolzi en els sistemes independents d'avaluació de la qualitat. Només així assolirem una base sòlida per a la presa de decisions polítiques i administratives que afecten el medi ambient del planeta.



La beauté dans le cerveau*

Jean-Pierre Changeux

Doctor en biologia, pioner de la neurobiologia moderna, catedràtic emèrit de l'Institut Pasteur i del Collège de France, a París. Membre de l'Acadèmia de les Ciències de França i de l'Acadèmia Nacional de Ciències dels EUA. President d'honor del Comité Nacional d'Ètica per a les Ciències de la Vida i de la Salut (CCNE). Premi Gairdner (1978), premi Balzan (2001) i medalla d'or del Centre Nacional de Recerca Científica (CNRS), 1992

Dilluns 30 d'agost

* Aquest text correspon al capítol 7 « Physiologie du collectionneur et de la collection » de la primera part del llibre de Jean-Pierre Changeux *Du vrai, du beau, du bien : une nouvelle approche neuronale*. © París: Odile Jacob, novembre 2008.

Physiologie du collectionneur et de la collection¹

Les mémoires des expériences acquises se perpétuent dans nos cerveaux sous forme de traces neuronales stables, la vie durant. Elles se transmettent également d'individu à individu, de cerveau à cerveau de manière épigénétique. Les gestes, les attitudes, le langage y participent. Mais elles peuvent aussi persister, voire évoluer, en dehors de nos cerveaux sous forme d'artefacts plus stables que notre tissu cérébral périssable. Ignace Meyerson (2000) a retenu parmi les traits caractéristiques de l'homme celui d'élaborer des produits différents de ce qu'il trouve dans le milieu extérieur et qu'il regroupe sous le nom d'*œuvres*. Les œuvres sont les témoignages de formes acquises de comportement les plus exemplaires et les plus stables qui soient.

Une collection d'art porte sur des « œuvres » au sens où Meyerson l'entend. Mais elle est culturelle à un degré supplémentaire. En effet, elle témoigne de ce que l'homme ne s'est pas contenté de fabriquer des œuvres, mais qu'il a tenu à les conserver. Meyerson ajoute : « L'homme a, de plus, valorisé certaines œuvres conservées, il les a socialisées. » C'est ainsi que l'on peut se demander si la collection ne se situe pas aux sources mêmes d'un champ propre à l'espèce humaine : celui, quelque peu inattendu ici, du « sacré ». Ne serait-elle pas l'élément fondateur du groupe social qui, témoignage matériel de l'activité créatrice de notre cerveau, confère en retour – par ce que Ian Hacking (1995) appelle *looping effect* – un pouvoir symbolique fort sur notre activité cérébrale ? La collection ferait partager des significations

¹ Ce texte date de 2006.

imaginaires au groupe social et contribuerait ainsi à la consolidation intersubjective du lien social ; elle l'« immortaliserait » d'une certaine façon sous la forme du sacré à travers les générations successives.

La collection serait encore plus : une source exceptionnelle de progrès dans l'évolution de nos sociétés – progrès de la raison, bien entendu. Dans *Méditations pascaliennes* (1997), Pierre Bourdieu écrit : « Le monde est compréhensible, immédiatement doté de sens, parce que le corps qui, grâce à ses sens et à son cerveau, a la capacité d'être présent à l'extérieur de lui-même, dans le monde, et d'être impressionné et durablement modifié par lui, a été longuement (dès l'origine) exposé à ses régularités. » L'évolution génétique des espèces, la phylogenèse, a conduit, à la suite d'interactions multiples avec l'environnement par variation-sélection, à la mise en place de notre architecture cérébrale. Celle-ci nous permet une première appréhension du monde, elle en constitue une première « représentation innée ». Cette évolution « génétique » se trouve relayée par l'évolution « épigénétique » des mentalités et des cultures. Les œuvres conservées sous la forme de collections sont elles-mêmes des « représentations acquises » du monde. Leur confrontation dans leur rassemblement contribue au progrès d'une connaissance qui devient, comme l'écrit Bourdieu, « un consensus primordial sur le sens du monde ». En d'autres termes, la connaissance devient objective. La collection aux sources du savoir scientifique et de sa diffusion ? L'abbé Grégoire l'avait en quelque sorte pressenti avec la création du Conservatoire des arts et métiers. Peut-on dire que la collection incorpore l'habitus et « confère à l'agent un pouvoir générateur et unificateur, constructeur et classificateur » ? La collection interviendrait, dans ces conditions, dans deux aspects de la culture : le sacré et le scientifique !

Explorer, collectionner, comprendre

Le comportement du collectionneur relève de fonctions cérébrales que l'on rencontre déjà chez les animaux. Ceux-ci possèdent une disposition innée à explorer le monde, à manifester une quête incessante de nouveauté que l'on

peut regrouper sous le terme générique de « curiosité ». Dans *Les Émotions primordiales et l'éveil de la conscience* (2005), le physiologiste australien Derek Denton suggère que, très tôt dans l'évolution des espèces, la curiosité apparaît, associée avec le développement de ce qu'il appelle les émotions primordiales. Chez la plupart des espèces animales, la faim, la soif, le désir sexuel sont des nécessités impérieuses. La vie sur terre ne se maintient que parce que les organismes s'alimentent et se reproduisent. À cette fin, des dispositifs neurobiologiques se sont constitués, qui incitent l'organisme à intervenir rapidement sur le monde. Prenons l'exemple de la soif. Cette « émotion primordiale » incite l'organisme à boire et, ayant repéré une source d'eau, à étancher sa soif en avalant la quantité nécessaire au retour de son sang à l'équilibre physiologique. En quelques minutes, il n'a plus soif. Et c'est dans ces conditions que s'observe un phénomène surprenant. L'animal perd la sensation de soif *avant* que le retour à l'équilibre minéral de son sang ne se soit produit. Il existe donc dans son cerveau, et c'est également vrai pour l'homme, des systèmes de neurones qui participent à une « conscience intérieure » de la sensation de soif. La perception de ce besoin, et celle de sa satisfaction, est en quelque sorte « symbolique », puisqu'elle anticipe « neurale » son expression physiologique. Cet exemple peut paraître fort éloigné de celui du collectionneur. Selon moi, collectionner relève, en fait, d'une chaîne de conduites analogues, même si l'objet en est différent, intellectuellement plus élevé, symboliquement plus élaboré, voire esthétiquement raffiné.

À l'origine, on trouve une émotion primordiale : *la motivation impérieuse*, la « soif d'acquérir » l'objet, et la mise en route d'un comportement de recherche, d'investigation du monde, appelé comportement exploratoire ; ensuite vient *la localisation possible de l'objet convoité* sur une carte mentale de l'environnement, par exemple l'hôtel Drouot ; à laquelle succède *la définition d'un plan de navigation* pour l'atteindre rapidement en se protégeant contre les prédateurs éventuels (des compétiteurs possibles, en particulier ceux qui possèdent des moyens d'acquisition bien supérieurs aux vôtres) ; puis *la rencontre effective de l'objet* ; et, enfin, *sa consommation*, c'est-à-dire son acquisition. Au lieu de se situer au niveau trivial de la satisfaction

de besoins primaires, les conduites du collectionneur, même si elles portent sur des objets culturels, mobilisent des stratégies analogues !

Le comportement d'« exploration » a fait l'objet d'abondantes études expérimentales chez les vertébrés. Il se distingue, sans ambiguïté, de comportements plus automatiques comme celui de « navigation ». Lors de l'exploration, l'organisme déploie une intense activité d'investigations, d'essais et erreurs, soit de manière ouverte par des actions sur l'environnement, soit de manière tacite, « virtuelle », par l'évocation interne d'objets mentaux. En permanence, il confronte ce qu'il perçoit – ou imagine – avec le réel extérieur ou avec des modèles intériorisés, qu'il a mis en mémoire, de ce qu'il recherche. Son cerveau fonctionne comme un « détecteur de nouveauté », réelle ou imaginaire. Il manifeste, de ce fait, ce qu'il est convenu d'appeler une flexibilité comportementale importante, qualifiée de comportement de curiosité. Il exploite pour cela un dispositif neuronal sur lequel nous reviendrons : l'espace de travail neuronal conscient (voir deuxième partie du livre). Cet espace de travail neuronal conscient donne accès à une diversité considérable de représentations, à une flexibilité comportementale gigantesque. Il exploite des neurones particuliers qui se distinguent par leurs axones extrêmement longs. Ceux-ci permettent de regrouper de manière transitoire des territoires dispersés dans l'ensemble du cortex cérébral. D'une manière quelque peu caricaturale, on pourrait presque qualifier cet ensemble de « dispositif neuronal de la curiosité » ! À l'appui de ce modèle, on notera que ces neurones à axone long sont particulièrement abondants dans le cortex préfrontal qui se développe, de manière littéralement « explosive », avec l'espèce humaine. La curiosité, qui, chez les espèces animales inférieures, intéresse les besoins immédiats d'alimentation et de reproduction, s'applique chez l'homme à des processus plus « abstraits », assure l'exploration de nouvelles niches et inclut la vie sociale et le monde culturel. L'exploration ne porte pas seulement sur le monde physique ou biologique, mais également sur les artefacts culturels – les œuvres d'art en particulier. Néanmoins, si la curiosité est nécessaire à la constitution d'une collection, elle ne suffit pas.

Les premiers vertébrés possèdent, dès leur origine, les moyens d'évaluer les conséquences de leur action sur le monde au moyen de ces neurones, peu nombreux mais aux fonctions essentielles pour la survie de l'organisme, dits « neurones de récompenses ». Ceux-ci sont en quelque sorte la « mémoire génétique » d'expériences réussies, positives ou négatives, réalisées au cours de l'histoire phylogénétique de leurs ancêtres, mettant en œuvre, à titre d'illustration, goût sucré et valeur nutritive, brûlure de la flamme et danger de mort... Ces neurones d'évaluation – récompense ou punition – permettent à l'organisme d'« économiser » des expériences. Ce sont quelques milliers de neurones dont les corps cellulaires sont localisés dans le cerveau moyen et dont les prolongements se trouvent dispersés de manière divergente dans de multiples territoires du cerveau, et en particulier du cortex cérébral. Ces neurones libèrent, de manière globale, des substances dites neuromodulatrices, comme la dopamine, la sérotonine, l'acétylcholine. Chez l'homme, leur évolution s'est développée dans plusieurs directions : d'abord, l'accès à des objets nouveaux, comme les « artefacts culturels », ce qui élargit considérablement le champ de leur participation à la vie de l'organisme ; ensuite, la mise en place de systèmes d'évaluation réfléchis sur eux-mêmes, d'*autoévaluation*. Ceux-ci offrent à l'organisme la possibilité d'effectuer des expériences internes qui se réfèrent à la mémoire d'expériences passées. Enfin, ces systèmes de récompense sont eux-mêmes susceptibles d'apprentissage – l'organisme dispose désormais de moyens d'anticiper une récompense positive (ou négative) et de planifier les conduites à venir en relation avec celles-ci.

Si le collectionneur est, en permanence, en train d'espérer de nouvelles acquisitions, c'est par disposition neurale. On sait que les neurones de récompense interviennent dans cette conduite qui, en se répétant, peut échapper au contrôle de la volonté et devenir une addiction. Certains collectionneurs peuvent perdre tout sens des règles élémentaires de la vie sociale. Werner Muensterberger (1994) cite le cas de Philip von Stoch (1691-1757), érudit et antiquaire allemand, qui était devenu espion à la solde du gouvernement britannique afin d'assouvir sa folle passion de pierres précieuses et n'éprouvait aucun scrupule à commettre des vols dans les collections qu'on l'inv-

taît à découvrir en tant qu'expert de renom. La reine Christine de Suède, quant à elle, n'hésita pas en 1648 à confisquer indûment l'extraordinaire collection de Rodolphe II, quelques jours avant la signature de la paix de Westphalie. Ces conduites addictives résultent d'un dysfonctionnement des neurones de récompense, au profit d'actions toutes orientées vers l'obtention de la « substance addictive », qu'elle soit un agent chimique ou un objet de désir, si symbolique soit-il.

Pour Muensterberger, « un peu comme le croyant, le collectionneur attribue un pouvoir et une valeur aux objets parce que leur présence et leur possession semblent avoir une fonction modificatrice – généralement agréable – sur leur état mental [...], une solution pour contenir les émotions qui font écho à des incertitudes et des traumatismes anciens ». En d'autres termes, le collectionneur « cherche éternellement à se rassurer [...] à l'aide d'objets ». Avec les œuvres d'art, la collection acquiert ce que Bourdieu appelle un *pouvoir symbolique*. Elle plonge, comme je l'ai déjà dit, dans la physiologie du sacré !

Ignace Meyerson a identifié comme spécificité unique de l'être humain une autre activité : non seulement il crée et il conserve, mais il classe. De ce fait, la collection se situe aux sources du savoir scientifique – de la doctrine de la science qui « rompt avec la nature », « pour construire une nouvelle réalité ». Gerald Edelman (1989) place cette capacité au centre de la conscience. Le sujet construirait une scène mentale dans le présent où se réaliserait la catégorisation perceptuelle de signaux sensoriels à partir d'un monde « non étiqueté ». Cette activité classificatoire reposerait sur la bonne marche d'un « comparateur cérébral conscient ». L'espace de travail neuronal comporte des neurones d'évaluation ou d'autoévaluation que nous verrions bien dans ce rôle.

Les premiers témoignages fossiles de cette activité classificatoire ont été recueillis par Leroi-Gourhan (1964), lors de fouilles dans la grotte du Renne à Arcy-sur-Cure, habitée par l'homme de Neandertal au Moustérien, environ 35 000 ans avant notre ère. Il y a découvert un premier regroupement

intentionnel de deux masses de pyrite de fer, d'une coquille de gastéropode fossile et un polypier de l'ère secondaire. On ne connaît pas les jalons par lesquels sont passés les hommes pour parvenir à la collection. Dès l'Antiquité en Grèce, on trouve des collections botaniques et zoologiques, des salles d'anatomie et des centres d'observations astronomiques qui s'édifient progressivement autour des sanctuaires, en particulier celui des Muses. Le plus célèbre est le « musée » d'Alexandrie. Le roi Ptolémée Soter, vers 300 avant notre ère, transpose à Alexandrie le Lycée d'Aristote en le dotant d'une bibliothèque qui rassemble « les livres de tous les peuples de la terre ». En parallèle, dons et butins de pillage reviennent aux détenteurs du pouvoir. La collection du roi ou du prince, celle de prélats, médecins ou juristes deviennent signes de distinction et de puissance. À la Renaissance, les humanistes recherchent avec passion les témoignages de l'Antiquité gréco-romaine. Au milieu du xvi^e siècle se répand dans le monde aristocratique le cabinet de curiosités, le *Kunst und Wunderkammer* (« Chambre d'art et de merveilles »), qui évoque plus les premières collections de l'homme de Neandertal que la bibliothèque d'Alexandrie... On y retrouve pêle-mêle curiosités naturelles, raretés exotiques, fossiles, coraux, pétrifications, animaux monstrueux et pièces d'orfèvrerie, objets ethnographiques, mais aussi statues antiques ou tableaux contemporains.

Parfois, la collection intervient dans la controverse savante. Francesco Calzolari, apothicaire à Vérone, rassemble un fonds considérable d'histoire naturelle avec le souci de réviser l'héritage scientifique de l'Antiquité et d'améliorer la pharmacopée. Son catalogue illustré de 1622 offre un premier arrangement systématique au lieu du simple document alphabétique. Ole Worm, naturaliste de Copenhague, critique dans son catalogue de 1655 nombre de croyances populaires comme les « cornes de licorne » qu'il identifie justement aux dents de narval. Remarquable philologue, il fonde l'archéologie nordique en publiant sa collection d'inscriptions runiques. Initialement associée au sacré, la collection progressivement se sécularise, devient précurseur de l'esprit encyclopédique, en un mot de la science proprement dite.

La méthode de classification se perfectionne d'abord avec celle des plantes de Linné, fondée sur une systématique « artificielle », « des formes, proportion, situation », ainsi que sur une nomenclature binominale. Buffon s'y oppose avec vivacité, préférant une organisation naturelle de complexité croissante, selon la « grande chaîne des êtres » d'Aristote. Bernard de Montfaucon, abbé de Saint-Germain-des-Prés, étend aux antiquités gréco-romaines et médiévales, dans son *Antiquité expliquée et représentée en figures* de 1719-1724, la méthode de classification systématique. Elle s'applique désormais aux beaux-arts. Avec la collection de dessins de maîtres de Pierre Crozat (1741) ou en Angleterre les *Discourses* (1719) de Jonathan Richardson, l'examen des œuvres d'art se systématise au point que ce dernier suggère que, pour les arts visuels, le *connoisseur-ship* doit être regardé comme une science authentique.

S'inspirant de *L'Arbre encyclopédique ou Système figuré des connaissances humaines* de Francis Bacon, d'Alembert et Diderot proposent, dans le *Discours préliminaire de l'Encyclopédie* (1751-1772), un tableau général de la généalogie et de la filiation de nos connaissances. Fait remarquable pour le neurobiologiste, ils proposent une division générale de la science humaine en histoire, poésie et philosophie selon, écrivent-ils déjà, les trois facultés de l'entendement, « cérébrales » s'il en est : la mémoire, l'imagination et la raison. Le projet débattu par la Convention d'un Muséum national unique reprenant la visée de l'*Encyclopédie* afin de démontrer l'unité de la connaissance revient à Quatremère de Quincy. Celui-ci aurait un but éducatif : « la vue d'une collection est au-dessus de tous les préceptes » et donnerait au citoyen un « spectacle intéressant ». Ce muséum central ne sera jamais construit, faute de crédits. Trois institutions indépendantes seront créées : le Muséum d'histoire naturelle, le musée du Louvre et le Conservatoire des arts et métiers. Deux cents ans ont consacré ce clivage irrémédiable, qui nous prive de cette vision encyclopédique du monde et d'une confrontation nécessaire. Doit-on en rester là ?

La collection de tableaux et les joies de la contemplation

Le champ de la collection n'a *a priori* aucune limite : du don Juan collectionneur de femmes au collectionneur de boutons ou de timbres-poste. Parmi les motivations, il y a, déjà mentionné, le plaisir du jeu de rassembler la collection, ou la délectation de regarder la collection une fois constituée. Il y a aussi une sorte de devoir de mémoire : sauver de la destruction les témoignages d'un passé révolu, d'une histoire riche d'enseignements.

La collection d'œuvres d'art rappelle plusieurs de ces motivations. Elle est une des formes les plus hautes de la culture, souligne Jacques Thuillier : elle réalise un environnement, rassemblé de manière intentionnelle, pour susciter la délectation. Elle témoigne d'une histoire révolue, certes, mais ses enseignements restent proches par leur contenu humain que notre regard questionne.

Le tableau est l'œuvre d'art par excellence, il a une histoire, un style, un sens. Dans sa sélection, le collectionneur se trouve confronté à « l'éblouissante et confondante variété d'images qui rivalise en étendue avec les créations du monde vivant qu'offre la nature » (Gombrich). La collection de tableaux ne se résume pas à un compte en banque bien approvisionné, aux conseils d'un investisseur professionnel ou à des coups de cœur irréfléchis. Le collectionneur doit atteindre un choix éclairé – une objectivité fondée sur une expérience visuelle, riche et éclairée. Roger de Piles distinguait déjà, dans son *Abrégé de la vie des peintres* de 1699, « le *curieux* qui se fait une idée d'un maître sur trois ou quatre tableaux, qu'il aurait vus » et se manifeste par des engouements naïfs et irrationnels, et le « *connaisseur*, habile par ses talents, par ses réflexions et par sa longue expérience ». Le collectionneur doit être un connaisseur. Cela demande effort et temps, et on n'est jamais sûr d'y parvenir.

Comprendre la science requiert un effort ! Comprendre un tableau également. Là est le paradoxe. Que l'objet de délectation se compare à un objet de science surprend. La raison en est que l'œuvre d'art est beaucoup plus

qu'un simple objet de plaisir. Elle possède une multiplicité potentielle de sens, un pouvoir évocateur, auquel on accède par une attention soutenue. La force de ce pouvoir évocateur varie avec ce qu'il est convenu d'appeler la *qualité* de l'œuvre. Comprendre un tableau, c'est retrouver, dans sa richesse de significations et dans son harmonie, sa singularité. C'est également le replacer dans le contexte de l'œuvre d'un artiste, d'une école, d'un pays et d'un siècle.

Le collectionneur d'art, et en particulier de tableaux, recherche des œuvres qu'il juge « belles », plus encore, exceptionnelles. Analyser sa démarche peut nous aider à cerner de plus près ce que j'ai appelé la « qualité » du tableau. L'artiste, selon Michel Onfray, « engage un échange », « propose une intersubjectivité ». Onfray y distingue deux temps : d'abord, « le perçoit sublime, c'est l'œuvre d'art qui nous cloue d'étonnement et d'admiration par son efficacité esthétique, brutale, immédiate, sidérante » ; puis, « après l'émotion, le raisonnement prend le relais et fabrique un discours qui donne suite à ce premier effet physiologique ». Ces deux temps rappellent les étapes successives de la découverte scientifique, notées en mathématique par Poincaré, puis par Hadamard. C'est d'abord l'« illumination » et le « caractère de beauté et d'élégance », l'« émotion esthétique » qui l'accompagne, « qui joue le rôle de crible délicat », travail inconscient et fulgurant auquel succède, selon Poincaré, le travail conscient de vérification, de la démonstration rigoureuse. Le collectionneur dans sa quête exploratoire procède, me semble-t-il, de manière très similaire. Que se passe-t-il dans la tête d'un collectionneur ? Est-ce le caractère imitatif – l'apparence de l'objet, du visage, de l'attitude – du tableau, en d'autres termes la *mimesis* des anciens Grecs, qui va retenir son attention sur telle ou telle œuvre ? Peut-être, mais cela ne suffit pas. L'efficacité esthétique du chef-d'œuvre ne se confond pas avec la copie hyperréaliste du réel.

Platon apporte une clarification importante qui, contrairement à ce que pense Onfray, ne présuppose aucun dualisme essentiel des fonctions cérébrales. La beauté se manifeste selon lui par un rapport formel de *convenance*, c'est-à-dire « le rapport entre les parties et un tout par lequel l'unité

de ce dernier s'impose à la multiplicité des parties ». Selon moi, la formule est toujours d'actualité. Un collectionneur-explorateur est saisi de manière « brutale, immédiate, sidérante » par la *composition* de l'œuvre – la manière dont l'œuvre peinte se trouve *organisée*, en d'autres termes, la « musicalité » des formes, des tons, des figures... Notre cerveau perçoit, « aperçoit », une « physique », une physiologie des résonances et des dissonances (Changeux, 2005).

Nous sommes également sensibles à un autre trait, moins bien reconnu, mais là encore commun, à l'art et à la science, celui de la *parcimonie*. L'éminent économiste et lauréat du prix Nobel Herbert Simon distingue la science de base, qui vise à décrire le monde, la conformité à la vérité empirique, et la science comme art, que mentionnait déjà Poincaré. Parcimonie, je l'ai dit, ne se confond pas avec simplicité : elle dénote plus spécifiquement le rapport de la complexité des données à la complexité de la formule les représentant. Cette recherche de parcimonie, qui est peut-être à l'origine des mathématiques, serait-elle à l'origine de l'activité esthétique elle-même ? Pour Herbert Simon, un trait propre aux humains est l'existence d'une réponse émotionnelle à la « beauté de la parcimonie » qui aurait ainsi été sélectionnée au cours de l'évolution des espèces. Elle serait utile à la survie des espèces par la capacité qu'elle offre de *détecter* des distributions « organisées » dans la nature. Le collectionneur esthète bénéficierait de cette exceptionnelle disposition naturelle. Il reconnaîtrait tout de suite dans l'œuvre qu'il examine la remarquable économie de moyens qui se manifeste par la vivacité du trait, la justesse de la touche, le contraste dans la juxtaposition des teintes qui créent cette « consonance sensorielle » unique dans le « contexte harmonique » de l'œuvre peinte... de qualité.

La perception immédiate de la composition ne peut se trouver satisfaite avec une copie ou une imitation. La vivacité – la « vitalité » – exige que l'œuvre soit un original. L'œil du collectionneur-explorateur – ou plutôt son cerveau – espère l'œuvre vivante, l'ouvrage original. S'il hésite à distinguer l'imitation, la copie, la réplique, l'interrogation surgit. La vision globale, la conception d'ensemble, le dessin, la formulation de l'élément poétique

coïncident-ils avec ce que l'on attend de l'écriture d'un maître ? S'approchant du tableau de plus près, les détails révèlent-ils une main habile, celle d'un copiste ou d'un débutant ? Qu'en est-il de la vigueur de la touche, de l'exactitude du dessin, des rapports de couleurs ? Découvre-t-on des repentirs, des reprises en des points stratégiques du tableau ? Des éléments du dessin de la composition initiale ont-ils été recouverts lors de l'achèvement du tableau ? Existe-t-il une hiérarchie dans le rendu du tableau qui insiste sur les passages signifiants et néglige ceux qui le sont moins ? Dans cette interrogation de l'œuvre, « le connaisseur réitère en pensée la prouesse imaginative de l'artiste » (Gombrich). L'examen de la qualité de l'œuvre, de récréatif, devient re-créatif. Il s'agit de retrouver le cheminement évolutif, les essais et erreurs du processus créateur de l'artiste. Avec cet examen, le collectionneur se porte à la rencontre de l'artiste. Il se replace « dans son cerveau ».

Parfois, dès le premier contact, le connaisseur reconnaît le style d'un artiste particulier, comme on reconnaît le visage d'un être familier. D'autres fois, le collectionneur tente de proposer un nom, une attribution. Il confronte le tableau qu'il a sous les yeux avec le stock d'images emmagasinées dans sa tête des œuvres d'artistes qu'il connaît : c'est un exercice de mémoire doublé de la mise en évidence de ressemblances (ou de différences) entre ce qu'il a sous les yeux et ce qu'il a déjà vu. Des images de mémoire – embrasements collectifs d'ensembles distribués de neurones – défilent dans l'espace conscient du connaisseur. Jusqu'à ce qu'une homologie, une congruence se présente entre traits pertinents des images de mémoire et de la sensation provoquée par l'œuvre examinée. Le nom de l'artiste se confirme. Une attribution du tableau est proposée. Sur bien des points, la démarche de l'attribution ressemble à celle des naturalistes qui, dès les ^{xvii}^e et ^{xviii}^e siècles avec Linné, Buffon, Lamarck, établirent les premiers catalogues systématiques des êtres vivants. Avec la difficulté supplémentaire de l'extrême diversité des créations possibles d'un artiste au cours de sa vie et même à un moment donné de sa vie, ainsi que de la disparition de l'œuvre entière de certains de ces artistes...

En réalité, l'expérience d'attribution se présente souvent sous des augures moins favorables. D'abord, la fidélité des images de mémoire est, par nature, limitée. La photographie pourra suppléer la mémoire humaine défaillante. L'hésitation persiste. Sur la base de la fréquentation des musées, des expositions et des monographies savantes s'acquiert le *connoisseur-ship*. Et la fêrule d'un *master* ou d'un *tuteur* est bien souvent mentionnée par les collectionneurs. Il est difficile d'être autodidacte en la matière. Ce savoir ne peut être strictement livresque. L'activité perceptive fait partie du domaine du subjectif. Elle est incommunicable dans sa totalité par la parole ou l'écrit : elle requiert l'expérience du regard et de la récompense partagés (Changeux, 2002). Elle demande en outre le débat critique, même si les regards convergent. L'attribution stylistique est difficilement une science à elle seule. L'examen rétrospectif des catalogues de tableaux de Rembrandt ou des primitifs italiens de la National Gallery de Londres l'illustrent abondamment. Des critères objectifs : l'origine documentée de l'œuvre, les signes irréfutables de l'appartenance à un artiste par une signature authentique, la chimie précise de la matière picturale, une composition unique, la datation rigoureuse peuvent décider d'une attribution (ou la détruire). L'œuvre existe sous plusieurs versions : l'une est dans un grand musée, une autre chez un marchand, une autre dans une collection particulière. L'artiste peut avoir peint plusieurs versions successives, l'atelier a pu également y participer. Les formats et la qualité varient. L'une est de grand format et d'excellente qualité : serait-elle l'original ? Ou l'un des originaux ?

Pourquoi, d'ailleurs, le nom de l'artiste a-t-il autant d'importance dans la relation du spectateur à l'œuvre ? Comment la connaissance de son nom peut-elle influencer notre approche « contemplative » de l'œuvre, participer au processus re-créatif ? Le peu de soin apporté à la présentation des cartels des œuvres accable trop souvent le visiteur de musées. Souvent il s'agit d'une position délibérée. Dans une exposition récente, les cartels étaient supprimés et le visiteur devait tenter de les lire, s'il le souhaitait, dans un livret séparé qu'il transportait avec lui. Comme si lire le cartel ou même être averti de son contenu était susceptible d'interférer avec l'appréhension

de l'œuvre, de nuire à la qualité du colloque singulier entre le spectateur et l'œuvre. À mon sens, le cartel est nécessaire. Le style projectif de notre cerveau en est la raison. La contemplation du tableau ne relève pas d'une attitude passive, mais exige une participation active du spectateur. Celui-ci explore le tableau par le regard, saisit les enchaînements de manière dynamique, tente de reconnaître une organisation sous-jacente. L'exploration se rapproche du raisonnement, suscite des interprétations émotionnelles, puise dans la multiplicité de sens qu'évoque l'œuvre d'art à partir du répertoire immense de sa mémoire à long terme. Sa faculté d'éveil ouvre à une abondante diversité d'expériences de pensée, qui laissent une part majeure au subjectif, à l'expérience individuelle. Le contenu de sens du cartel n'impose en rien une vision totalitaire du tableau, mais enrichit, au contraire, le répertoire des multiples niveaux de compréhension de l'œuvre. Elle contribue à le replacer dans le contexte de l'ensemble de l'œuvre d'un artiste, d'une école – bref, à en apprécier un peu plus sa *qualité*, son intelligence. Un tableau se comprend. Le collectionneur qui a retenu un tableau pour ses qualités intrinsèques d'œuvre peinte sait à quel point l'accès au nom de l'artiste peut bouleverser ses rapports avec l'œuvre. Le nom déclenche des associations, un écheveau sémantique, qui démultiplie le pouvoir de rêve du tableau, sans lui enlever quoi que ce soit de sa qualité esthétique. La précision du cartel enrichit la compréhension de l'œuvre et intervient de ce fait directement dans le plaisir de sa contemplation.

Les recherches sur les bases neurales de la contemplation et de la collection sont encore balbutiantes. L'importance de la contribution du cortex frontal a été soulignée à plusieurs reprises, en particulier à propos du comportement exploratoire et de l'évaluation. Cette contribution s'élargit au dialogue rapproché du spectateur avec le tableau qui caractérise contemplation et attribution. Ce cortex frontal est une structure récente de notre cerveau. Hiérarchiquement la plus élevée, elle inclut les architectures de l'espace de travail neuronal conscient. À son niveau a lieu une synthèse singulière (Changeux, 1994 ; Aharon *et al.*, 2001) entre processus cognitifs et système limbique où les réponses émotionnelles se diversifient en une immense palette de « sentiments »... Une intégration de l'important travail non conscient de

traitement d'images, de recherche de noms, d'évocation de mémoire à long terme se produit avant que l'œuvre d'art n'accède à l'espace conscient.

Charles Le Brun, père fondateur de la neuroesthétique ?

Charles Le Brun et son école, mais aussi ses émules Charles Errard ou Pierre Mignard, ses collaborateurs ou disciples, Coypel, La Fosse, les Boullogne ou Jouvenet, sont les acteurs les plus connus de l'intense activité picturale qui accompagne la seconde partie du règne de Louis XIV. Souvent, le grand public ne retient des très nombreux travaux exécutés pendant cette période que les grands décors de Versailles ou quelques portraits officiels d'aristocrates – une peinture qui peut paraître grandiloquente, convenue, en un mot « académique », avec tout ce que ce terme évoque de poussiéreux et de solennel. Cette opinion mérite d'être revue. Avec le recul du temps, on peut, en effet, aujourd'hui regarder Le Brun comme l'un des pères fondateurs de la neuroesthétique.

D'abord un peu d'histoire. L'Académie est créée de manière indépendante en février 1648 par Charles Le Brun sous la direction de Mazarin, mais ne devient Académie royale de peinture et de sculpture qu'en 1663, passant désormais sous le contrôle du roi. L'Académie est d'abord un lieu de débat, une école dans le sens antique du terme, mais aussi un lieu d'expositions dont la fonction très politique est d'incarner et de diffuser le style du Roi-Soleil. Elle en définit les règles, les enseigne, leur donne une visibilité. Elle est aussi le lieu de réflexion où s'élaborent la théorie de l'art et sa philosophie fondatrice. Le discours prononcé par Charles Le Brun le 17 avril 1668 devant cette académie sur l'expression des passions intitulé *L'Expression générale et particulière* précise sa position qui, de fait, devient position officielle (Philippe, 1994). Elle nous permet de mieux comprendre cette peinture et peut-être même de l'aborder avec un regard neuf. L'art de Le Brun et de ses contemporains surprend parce qu'il se situe aux antipodes de la peinture sur le « motif » qu'illustrera avec tant de succès le XIX^e siècle avec l'impressionnisme. De fait, le projet théorique de Le Brun n'est pas de

peindre le monde d'après nature, mais – et en cela il nous intéresse – de le reconstruire, *en rationaliste*, sous la forme d'un « système formel » qui régit l'intégralité des êtres et de leurs relations. Il ne s'agit pas de rechercher ce qu'il y a de singulier dans l'instant, dans l'individuel, « dans la vie », mais de viser l'universalité tant des hommes eux-mêmes que de leur histoire ou de leur croyance. Les thèmes de Le Brun et de ses contemporains sont traditionnels, ce sont ceux de l'orthodoxie catholique, de l'Ancien au Nouveau Testament, mais ce sont aussi ceux de l'histoire et de la mythologie gréco-romaine, dans le contexte d'une « divine Providence » déterminant une histoire universelle qui converge sur le couronnement du monarque de droit divin. Mais Le Brun, à travers cette thématique classique, est un universaliste d'une tout autre manière – un « révolutionnaire ».

Le projet rationaliste de la peinture de Le Brun est parallèle à celui de la « nature géométrisée » des jardins de Versailles par Le Nôtre : il est de « dresser un tableau systématique des passions s'enchaînant les unes à partir des autres, et les peindre telles qu'elles apparaîtraient si la nature exprimait leur essence » (Philippe, 1994). Son projet se présente sous certains aspects comme scientifique – une recherche de vérité (Changeux, 2002, 2004) – dans la définition et la physiologie – la plus mécaniste qui soit – de chaque passion de l'âme. Même s'il ne les cite pas, Le Brun a lu le médecin Cureau de La Chambre et ses *Caractères des passions* (1640) et, bien entendu, le René Descartes du *Traité des passions* (1649) et du *Traité de l'homme*, dont la première édition est publiée par Clerselier en 1664, quelques années avant la conférence devant l'Académie et qui peut être interprété comme un magnifique traité de cybernétique neuronale qui anticipe de trois siècles sur bien des points (avec des exceptions notables comme le rôle attribué à la glande pinéale) les travaux de la neuroscience contemporaine.

La conférence de Le Brun débute par quelques définitions générales : « l'expression, écrit-il, est une naïve et naturelle ressemblance des choses que l'on a à représenter », « elle est aussi bien dans la couleur que dans le dessin ; elle doit être encore dans la représentation des paysages et dans l'assemblage des figures ». Le Brun entre ensuite dans le vif du sujet : « L'expres-

sion est aussi une partie qui marque des moments de l'âme, ce qui rend visibles les effets de la passion. »

Suit un long développement où Le Brun s'adresse aux « étudiants en peinture », reprenant, de manière quasi littérale, le *Traité de l'homme* de Descartes, il écrit : « Premièrement, la passion est un mouvement de l'âme [...], tout ce qui cause à l'âme de la passion, fait faire au corps quelques actions. [...] L'action n'est autre chose que le mouvement de quelques parties et le changement ne se fait que par le changement des muscles ; les muscles n'ont de mouvement que par l'extrémité des nerfs qui passent au travers, les nerfs n'agissent que par les esprits qui sont contenus par les cavités du cerveau, et le cerveau ne reçoit des esprits que du sang qui passe continuellement par le cœur, qui l'échauffe et le raréfie de telle sorte qu'il produit un certain air subtil qui se porte au cerveau, et qui le remplit. » Il poursuit : « Le cerveau, ainsi rempli, renvoie de ces esprits aux autres parties par les nerfs qui sont comme autant de petits filets ou tuyaux qui portent ces esprits dans les muscles, plus ou moins, selon qu'ils en ont besoin pour faire l'action à laquelle ils sont appelés. » Il mentionne ensuite la « petite glande qui est au milieu du cerveau » où « les deux images qui viennent par les deux yeux s'assemblent en une, avant qu'elle parvienne à l'âme »...

Quant à l'âme, Le Brun reprend les « anciens philosophes » en lui assignant des attributs bien matériels dans sa partie sensitive, des « appétits » : « concupiscible » pour les passions simples (l'amour, la haine, le désir, la joie, la tristesse) ou « irascible » pour les passions les plus farouches et celles qui sont composées (la crainte, la hardiesse, l'espérance, le désespoir, la colère et la peur). Le cours de neuroscience de notre peintre du roi ne s'arrête pas là. Il propose ensuite une curieuse théorie, on ne peut plus mécaniste, sur la manière dont les « mouvements intérieurs » d'une « âme jointe à toutes les parties du corps » « exercent ses fonctions sur le visage ». Le « sourcil est la partie de tout le visage où les passions se font mieux connaître », car il se situe à la hauteur de la fameuse glande pinéale. Le Brun, sur cette base théorique, tente alors de décrire – schéma à l'appui – l'expression des diverses passions du corps. Afin d'en souligner

l'universalité, il ira même rechercher – dans une conférence de 1680 – la « ressemblance et le rapport des parties de la face humaine avec celles des animaux » (figure 18). Charles Darwin, dans son ouvrage de 1887, *L'Expression des émotions chez l'homme et les animaux*, ne s'y trompera pas et mentionnera dans l'introduction « les fameuses conférences publiées en 1667 » du peintre Le Brun qui, selon lui, « contiennent quelques bonnes observations ».

L'essai de synthèse de l'art et de la science que nous proposent Le Brun et ses contemporains, même s'il se trouve bien différent des recherches artistiques et neurobiologiques contemporaines, mérite d'être pris au sérieux. Son « effort de vérité » sur l'expression des « passions » – on dirait aujourd'hui des émotions – nous concerne. L'expression des passions simples, qu'il isole et dénombre comme des « éléments chimiques », se complète de « combinaisons de ces éléments passionnels comme se forment les corps chimiques » (Philippe, 1994). Cette chimie picturale des émotions mène Le Brun à une « clarté qui baigne un univers d'idées claires et distinctes et qui s'enchaînent les unes aux autres ».

Le Brun a-t-il délibérément rejeté ou n'a-t-il pas suffisamment insisté sur cette touche qui singularise, dans la diversité des traits du visage et des attitudes, le moment subtil du sentiment, au-delà de la force de l'émotion ? Duchenne de Boulogne, deux siècles plus tard, reprendra l'analyse, désormais à l'aide de la photographie. Sa démarche sera tout aussi mécaniste que celle de Le Brun, mais il disposera de données myologiques nouvelles. Il utilisera la stimulation électrique pour identifier les muscles dont la contraction ou le relâchement créent la mimique faciale caractéristique de chacune des principales émotions. Darwin, là encore, ne s'y trompe pas. Il note que « ses travaux ont été traités légèrement ou même complètement négligés par certains de ses compatriotes » et poursuit : « À mon avis le travail du docteur Duchenne représente un progrès considérable [...]. Personne n'a plus soigneusement étudié la contraction de chaque muscle en particulier et le plissement de la peau qui en résulte. » La postérité de Le Brun ne s'arrête pas là. Son intérêt pour l'expression des émotions et leur physiologie se

poursuivra avec Géricault, David d'Angers, Courbet et bien d'autres (Changeux et Clair, 1994). Son œuvre témoigne d'une visée rationnelle et universaliste, d'une clarté scientifique qui vont bien au-delà d'un strict art officiel.

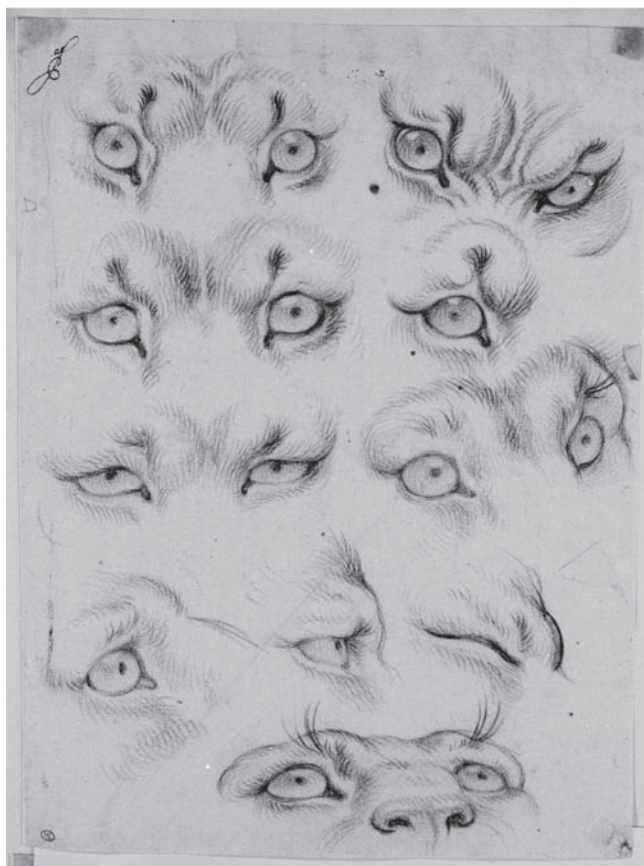


FIGURE 18 – Charles Le Brun, *Étude d'yeux et de sourcils du tigre et du loup-cervier*. Le peintre Charles Le Brun (1619-1690) peut être considéré comme un des pères fondateurs de la neuroesthétique. Ces dessins témoignent de son intérêt pour l'expression des émotions. Il fonde sa théorie, présentée pour la première fois devant l'Académie royale de peinture le 17 avril 1668, sur le rôle attribué par Descartes au cerveau, ses « petits tuyaux » (les nerfs) et les « esprits animaux » (signaux électriques et chimiques) qui y circulent. Anticipant Darwin, il relève ici des analogies surprenantes dans l'expression du regard du tigre et du loup-cervier avec l'homme.



Diversité du génome humain : de nos origines à nos maladies

Lluís Quintana-Murci

Doctor en genètica per la Universitat de Pàvia (Itàlia). Biòleg, director de la Unitat de Genètica Evolutiva Humana de l'Institut Pasteur. Medalla de bronze del CNRS (2008). L'any 2009 obté el premi Dagnan-Bouveret de l'Acadèmia Francesa de les Ciències i el premi Georges, Jacques i Elias Canetti.

Dimarts 31 d'agost

La dernière décennie a vu des avancées extraordinaires en génomique humaine. Le séquençage du génome humain nous a permis, d'une part, de mieux connaître l'architecture de notre génome et d'autre part, de localiser les gènes qui font partie de notre génome et leur structure. Cependant, cette avancée pionnière nous a très peu renseignés sur la diversité de notre génome, sur le taux de variabilité génétique que diffère entre les individus, entre les populations humaines. C'est pour cette raison que plusieurs consortiums internationaux (The SNP Consortium, HapMap, The 1000 Genomes Project) se sont organisés autour de ce but afin de mieux caractériser la variabilité génétique et établir ainsi une carte génétique au niveau des populations humaines. Nous savons aujourd'hui que, si l'on compare les génomes de deux individus pris au hasard dans la population générale, quelle que soit son origine ethnique ou géographique, seulement 0,1% de ses génomes (au niveau des changements de bases nucléotidiques) vont différer. Ce « peu » de variabilité correspond cependant à 3 millions de bases qui vont être différentes entre deux individus (sur les 3 milliards qui constituent le génome humain), ces trois millions de bases étant l'outil de travail pour les généticiens humains et de populations. Aujourd'hui, environ 11 millions de variantes génétiques (appelées SNPs, pour *Single Nucleotide Polymorphism*) ont été décrites. La plupart de ces variantes génétiques n'ont pas de conséquences phénotypiques, du moins des conséquences génétiques connues. Quand une variante génétique n'a pas des conséquences au niveau du phénotype de l'individu, on parle alors de SNPs « neutres », c'est-à-dire, des mutations qui ne sont pas soumises à la sélection naturelle, car elles n'ont pas d'effets sur la *fitness* de l'individu (sa capacité de survivre et de se reproduire). L'étude de la répartition de la variabilité génétique neutre entre populations humaines est très informative pour ce qui est de mieux comprendre l'histoire de l'Homme, ses origines et les migrations humaines. En

revanche, une partie de cette variabilité génétique a des conséquences sur les phénotypes humains, qu'il s'agisse des phénotypes « bénins » comme nos différences physiques (taille, pigmentation de la peau et des cheveux, etc.) ou des phénotypes potentiellement associés à des états pathologiques (*e.g.* différences dans la susceptibilité aux maladies).

Dès le début de la génétique moderne, on a distingué quatre facteurs qui influencent la variabilité génétique : **la mutation** qui produit de nouveaux types génétiques, **la sélection naturelle** qui favorise les types génétiques susceptibles de s'adapter au mieux à l'environnement dans lequel ils évoluent (climat, exposition aux pathogènes, métabolisme des aliments, ...), **la dérive génétique** qui est l'effet du hasard dû aux fluctuations des fréquences de types génétiques d'une génération à l'autre et **la migration**. Cependant, les processus démographiques et sélectifs sont difficiles à distinguer car ils peuvent avoir des effets identiques sur la variabilité génétique. Par exemple, la sélection naturelle et l'histoire des populations peuvent se mimer l'une et l'autre dans la formation des variations génétiques ; une expansion récente d'une population peut produire un signal qui pourrait être confondu avec celui d'un balayage sélectif au niveau d'un seul locus. Avec le progrès de la génomique humaine, ainsi qu'avec le développement des tests statistiques de plus en plus robustes, nous pouvons aujourd'hui démêler la partie de la variabilité génétique qui résulte des effets de la démographie de celle due aux effets de la sélection naturelle. Enfin, une dernière force très « humaine » va également influencer la distribution de la variabilité génétique dans les populations humaines : les forces socioculturelles. Nous allons également voir un exemple par la suite.

La sélection naturelle et l'histoire des populations jouent donc toutes les deux un rôle décisif dans la formation des modèles de variabilité, mais ces processus peuvent se mimer mutuellement dans le façonnement de la variation génétique. Il existe néanmoins une différence fondamentale entre ces processus : les forces démographiques influencent de la même manière la totalité du génome (une réduction de diversité, suite à un goulot d'étranglement, est visible dans tout le génome). En revanche, la sélection naturelle

agit de manière ciblée et variable dans certaines parties du génome, dépendant de la fonction spécifique de ces régions et de leur rôle dans l'adaptation à l'environnement. L'ensemble de ces forces ainsi que des facteurs environnementaux ont une influence sur la santé des populations, voire sur la résistance ou sur la susceptibilité des individus ou sur des populations à certaines maladies, notamment aux maladies infectieuses. En effet, les maladies infectieuses ont certainement constitué un facteur de pression de sélection majeur dans le processus d'adaptation de notre espèce aux différents environnements.

Variabilité génétique et origines de l'Homme

L'étude de la diversité génétique « neutre » des individus et des populations permet de comprendre l'origine de notre espèce, mais aussi les éventuelles interactions historiques entre les peuples. L'intérêt d'étudier la variabilité génétique neutre est d'avoir accès à des régions du génome qui sont, en théorie, non déterminantes d'un point de vue biologique ou cognitif et ainsi ne subissent aucune contrainte environnementale ou liée à des maladies qui limiteraient leur diffusion. Dans les dernières décennies, les marqueurs génétiques les plus utilisés dans le cadre des origines de l'Homme et le peuplement de la planète ont été les séquences de l'ADN héritées par un seul des parents : l'ADN mitochondrial (ADNmt) hérité par la mère, et le chromosome Y hérité par le père. L'utilité de ces marqueurs génétiques à hérité uniparentale réside dans le fait que les séquences d'ADN portées par ces chromosomes échappent à la recombinaison méiotique. En effet, l'ADNmt et la région spécifique du chromosome Y ne recombinent pas lors de la méiose et, par conséquent, sont transmis sans modification à la génération suivante. De plus, la comparaison des données provenant du chromosome Y et de l'ADNmt permet de mettre en évidence des différences culturelles et démographiques entre les hommes et les femmes (exogamie patrilocale, polygamie, etc.). L'ensemble de ces études montre que les populations africaines présentent la diversité génétique la plus élevée au niveau mondial et que la diversité allélique chez les populations non-africaines est

essentiellement un sous-ensemble de celle observée en Afrique. Ces observations sont ainsi en accord avec la plupart des données provenant de la paléoanthropologie et soutiennent ainsi une origine récente de notre espèce en Afrique, il y a 150 000-200 000 ans. Même si les études de l'ADNmt et du chromosome Y ont largement contribué à mieux connaître la structure génétique des populations humaines, leurs migrations et la façon dont elles ont interagi, ces deux marqueurs génétiques, bien qu'extrêmement informatifs, ne représentent qu'une petite partie de notre génome. C'est plus récemment que les origines de l'homme et la structure génétique des populations humaines ont commencé à être étudiées d'un point de vue plus génomique. Aujourd'hui, il est possible d'étudier la variabilité du génome humain dans son ensemble, en utilisant soit des techniques de génotypage à haut débit ou de séquençage de dernière génération, qui permettent d'avoir accès à la variabilité génétique de centaines de milliers de SNPs réparties d'une façon homogène dans notre génome. Ces études montrent également que la plus grande diversité est observée dans les populations africaines et que plus on s'éloigne du berceau d'origine de notre espèce, l'Afrique, plus la diversité génétique est réduite. En outre, ces études dites *genomewide* (génome entier) ont permis de caractériser beaucoup plus finement le taux de mélange de certaines populations et de donner une vision beaucoup plus globale, et moins biaisée, de la variabilité génétique des populations humaines. Toutes les études génétiques s'accordent ainsi sur le fait que toutes les populations actuelles proviennent d'une population africaine, de faible taille efficace qui aurait quitté l'Afrique il y a environ 60 000-100 000 ans pour coloniser le reste du monde.

Aussi bien les données génétiques que les données provenant d'autres disciplines s'accordent sur le fait que lorsque l'Homme quitta l'Afrique, très tôt l'Asie du Sud fut colonisée, et très rapidement l'Homme arriva en Australie il y a environ 50 000 ans. L'Europe fut colonisée il y a environ 40 000-50 000 ans, et beaucoup plus tard les Amériques il y a environ 15 000-30 000 ans. Mais lors de cette colonisation du globe par l'Homme dit moderne (cf. *Homo sapiens*), celui-ci, a-t-il rencontré les autres populations d'hominides qui habitaient d'autres régions de la planète ? Les nouveaux

arrivés *Homo sapiens* ont-ils interagi avec les populations autochtones d'hominidés, comme l'Homme de Neandertal ? Se sont-ils mélangés ? Des études récentes basées sur des génomes entiers suggèrent que le taux de mélange entre *Homo sapiens* et l'Homme de Neandertal, s'il a vraiment existé, a été très faible.

Variabilité génétique et évolution culturelle

Une caractéristique unique de notre espèce est que son évolution récente s'est produite sur deux niveaux : biologique et culturel. Le fait que les hommes résultent de la conjonction de ces deux processus évolutifs a permis d'émettre un grand nombre d'hypothèses sur le degré d'interdépendance et d'interaction entre les évolutions biologiques et culturelles. Le mode de vie d'une population constitue une part intégrale et caractéristique de l'identité culturelle de cette population. Cette dernière peut être fondée sur différents facteurs, comme la langue, les coutumes de mariage, les groupes de filiation, entre autres. Certaines de ces caractéristiques socioculturelles peuvent influencer la variabilité du génome au niveau de la population. Même si l'ADNmt et le chromosome Y ne représentent qu'une petite partie de notre génome, leur hérité monoparentale fait d'eux des marqueurs génétiques très informatifs pour mieux comprendre la dynamique de certains facteurs culturels et sociaux qui diffèrent entre les hommes et les femmes. Par exemple, l'étude conjointe de ces deux marqueurs génétiques dans les mêmes populations humaines a permis de mieux comprendre l'étendue de certains facteurs culturels comme la polygamie, l'exogamie, la patrilocalité, ou la structure sociale organisée en castes en Inde.

La relation entre variabilité génétique et évolution culturelle est un sujet de recherche de pointe qui nécessite d'une véritable recherche pluridisciplinaire à l'interphase entre les sciences de la vie et les sciences de l'Homme et la société. De nombreuses sociétés dites « traditionnelles » sont organisées en groupes de filiation : un individu appartient à un lignage, les lignages sont regroupés en clans et les clans en tribus. D'après la tradition orale, les

membres d'un même groupe de filiation descendent d'un ancêtre commun en ligne paternelle ou en ligne maternelle. Ces groupes de parenté correspondent-ils à des entités biologiques ou sont-ils des groupes socialement construits ? Dans l'hypothèse d'une concordance entre groupes sociaux et biologiques, deux individus appartenant au même groupe social devraient davantage se ressembler génétiquement que deux individus pris au hasard dans la population. En collaboration avec le laboratoire d'Evelyne Heyer au Musée de l'Homme à Paris, nous avons analysé l'apparentement génétique d'individus se déclarant du même groupe de filiation selon trois niveaux de regroupement (lignage, clan et tribu), dans 5 populations d'Asie Centrale, où les regroupements sont patrilinéaires. L'apparentement de ces populations a été mesuré par une analyse des variations du chromosome Y qui est transmis aussi d'une façon patrilinéaire. Nous avons constaté que les individus appartenant à un même lignage se ressemblent plus génétiquement que des individus pris au hasard dans la population. Les mêmes résultats ont été trouvés pour les individus d'un même clan. En revanche, les individus appartenant à une même tribu ne se ressemblent pas plus génétiquement que des individus pris au hasard dans la population globale. Ces résultats nous ont permis de proposer que les lignages et les clans correspondent à des entités génétiques alors que les tribus résultent d'un regroupement social et non biologique, de clans d'origines diverses. Cette étude illustre l'apport de la génétique des populations dans le but de mieux comprendre certains comportements et modes d'organisation de nos sociétés.

Variabilité génétique et sélection naturelle : le cas des maladies infectieuses

L'étude de l'histoire et l'évolution de notre espèce ne se résume pas à l'étude de ses origines et de ses migrations. Une partie intégrale de notre histoire en tant qu'espèce est notre histoire « adaptative ». Depuis l'apparition d'*Homo sapiens* et lors de ses différents déplacements pour coloniser les différentes régions du globe, notre espèce a dû faire face aux différents environne-

ments qu'elle a rencontrés – différentes conditions climatiques, ressources nutritionnelles et écosystèmes pathogéniques – et s'y adapter. Ces processus d'adaptation ont entraîné des processus biologiques sélectifs qui laissent des signatures moléculaires identifiables sur notre génome. La détection de l'influence de la sélection naturelle sur le génome humain représente un outil puissant pour identifier des régions génomiques ayant joué un rôle biologique majeur dans la survie de notre espèce et pour mieux comprendre son histoire adaptative. Plus particulièrement, l'exposition des populations humaines aux différents pathogènes et donc, aux maladies infectieuses, a probablement été un des facteurs sélectifs les plus importants au cours de l'évolution de l'Homme. Ainsi, l'identification des gènes impliqués dans la réponse immunitaire qui ont été ciblés par la sélection naturelle peut, d'une part, apporter de nouvelles connaissances sur les mécanismes de défense immunologique et, d'autre part, identifier des voies de signalisation immunologiques jouant un rôle important dans la résistance aux pathogènes. Un des exemples les plus connus de sélection naturelle et maladies infectieuses est le cas de l'allèle S de l'hémoglobine (HbS) : l'état homozygote de HbS est associé à la drépanocytose ou anémie falciforme. En revanche, les individus porteurs de la mutation HbS, en état hétérozygote, sont protégés du paludisme causé par *Plasmodium falciparum*. Ainsi, malgré les effets néfastes de la mutation en état homozygote, cette mutation est augmentée en fréquence en Afrique par sélection positive car elle a conféré un avantage évolutif de protection contre la malaria.

De nombreuses études ont mis en évidence les effets de la sélection sur des gènes humains impliqués dans l'immunité acquise ou dans les relations hôte/pathogène (ex. CMH, G6PD, CCR5, Duffy, etc.). Cependant, très peu d'études ont eu pour objet l'impact de la sélection naturelle sur les gènes impliqués dans le système immunitaire inné. En effet, l'immunité innée constitue la première étape de la réponse immunitaire en reconnaissant, à travers ses récepteurs, des motifs moléculaires présents sur la surface des pathogènes. Nous avons étudié l'influence de la sélection exercée par les pathogènes sur plusieurs régions génomiques impliquées dans la réponse immunitaire innée.

À l'échelle de gènes candidats, nous avons étudié dans quelle mesure la sélection naturelle a modulé les profils de diversité génétique des récepteurs de l'immunité innée DC-SIGN, L-SIGN et MBL2. Nous avons montré que les deux gènes homologues DC-SIGN et L-SIGN ont suivi des processus évolutifs entièrement différents. L'évolution de DC-SIGN a été caractérisée par une forte contrainte sélective, ce qui a empêché l'accumulation de mutations changeant la séquence amino-acidique, alors que la variabilité de L-SIGN résulte de l'action de la sélection balancée (*i.e.* avantage à la diversité génétique) dans les populations non-africaines. Pour MBL2, nos analyses évolutives indiquent que les profils de variabilité de ce gène sont compatibles avec la neutralité. Cette observation, ainsi que la forte prévalence d'allèles délétères de MBL2 dans les populations humaines, suggèrent un rôle largement redondant de cette lectine dans le contexte des défenses immunitaires chez l'Homme. À l'échelle de famille de gènes, nous avons recherché les signatures génétiques de sélection naturelle dans la famille des récepteurs Toll-like (TLRs) humains. Nos analyses ont identifié deux groupes de TLRs qui diffèrent dans leur importance biologique. TLR3, TLR7, TLR8 et TLR9 qui sont impliqués dans la reconnaissance des acides nucléiques et donc, principalement impliqués dans la reconnaissance des virus, sont sous forte contrainte sélective (sélection purificatrice), ce qui souligne leur rôle essentiel et non-redondant pour la survie de l'Homme. Au contraire, les six autres TLRs qui détectent des motifs moléculaires présents à la surface des bactéries et des champignons, présentent un clair relâchement de la contrainte sélective, ce qui soutient leur redondance biologique plus importante. Plus récemment, nous avons identifié une combinaison haplotypique dans les gènes TLR1-6-10, qui entraîne une diminution de la réponse inflammatoire qui a conféré un avantage évolutif aux populations européennes. Ce même haplotype a été associé à une protection plus importante contre la tuberculose et la lèpre. Enfin, à l'échelle du génome entier, nous avons montré que la sélection positive a ciblé des régions géniques, principalement aux niveaux des variants soit non synonymes soit localisées dans des régions régulatrices. Ces analyses nous ont permis de démontrer que la sélection positive a exacerbé, pour certains gènes, la dif-

férenciation génétique des populations résultant de l'action de la sélection positive locale.

Dans le cadre de nos études sur l'influence de la sélection naturelle dans le génome humain, nous nous sommes également intéressés à l'étendue de la sélection dans des gènes codants pour des enzymes de métabolisation des xénobiotiques. Par exemple, nos études sur les arylamines N-acétyltransférases ont montré que le phénotype « acétylateur lent » est plus fréquent dans les populations agricultrices et qu'un balayage sélectif partiel a favorisé des allèles « acétylation lente ». Ces observations suggèrent que la transition vers l'agriculture a modifié les pressions sélectives agissant sur les N-acétyltransférases. Une étude plus récente visant à quantifier l'impact de la sélection naturelle sur les micro-ARNs – de petites séquences codant des ARNs non traduits aux rôles régulateurs divers et essentiels – nous a permis de montrer que les différents domaines fonctionnels des micro-ARNs sont soumis à différentes contraintes sélectives. Enfin, en analysant les signes de sélection positive chez l'Homme dans 100 gènes impliqués dans la pathogénèse du virus du sida, nous avons identifié une demi-douzaine de gènes d'importance pour la survie de l'Homme. D'un point de vue plus médical, nous avons montré une association entre deux variantes du promoteur de gène DC-SIGN, impliquées dans la réponse immunitaire innée et un risque diminué de développer la tuberculose. Plus récemment, nous avons étudié l'impact d'une déficience commune de G6PD en Asie du Sud-Est – la mutation G6PD-Mahidol487A – sur la survie de l'homme en relation avec le paludisme à *Plasmodium falciparum* et à *Plasmodium vivax*. Nos résultats montrent que la mutation Mahidol a été la cible d'une sélection positive forte et récente. Ils montrent que cette mutation réduit la densité parasitaire de *P. vivax*, mais pas celle de *P. falciparum*, chez l'Homme, ce qui suggère que *P. vivax* a été et est, une cause majeure de l'avantage sélectif fort conféré par la déficience en G6PD.

En conclusion, nos travaux ont identifié un groupe de gènes qui pourrait expliquer les différences morphologiques et de susceptibilité aux maladies que l'on observe dans les populations humaines d'aujourd'hui. Dans leur

ensemble, nos différentes études ont montré que la sélection naturelle a significativement influencé l'évolution récente de notre espèce et que les pressions de sélection exercées par les agents infectieux ont été particulièrement importantes dans le façonnement de la diversité du génome humain. Plus généralement, les études de génétique des populations et d'évolution sont très utiles pour mieux comprendre l'origine et l'histoire de notre espèce, ses migrations et les différents taux de brassage entre populations humaines et comment la sélection naturelle et plus particulièrement celle imposée par les pathogènes, a influencé la diversité de notre génome et nos relations actuelles avec les maladies.

Quelques articles de revue à lire

Cavalli-Sforza L.L., Feldman M.W. (2003) « The application of molecular genetic approaches to the study of human evolution ». *Nat Genet.* 33:266-75

Sabeti P.C., Schaffner S.F., Fry B., Lohmueller J., Varilly P., Shamovsky O., Palma A., Mikkelsen T.S., Altshuler D., Lander E.S. (2006) « Positive natural selection in the human lineage ». *Science.* 312(5780):1614-20

Quintana-Murci L., Alcaïs A., Abel L., Casanova J.L. (2007) « Immunology in natura: clinical, epidemiological and evolutionary genetics of infectious diseases ». *Nat Immunol.* 8(11):1165-71

Nielsen R., Hellmann I., Hubisz M., Bustamante C., Clark A.G. (2007) « Recent and ongoing selection in the human genome ». *Nat Rev Genet.* 8(11):857-68

Barreiro L.B., Quintana-Murci L. (2010) « From evolutionary genetics to human immunology: how selection shapes host defence genes ». *Nat Rev Genet.* 11(1):17-30



Del microcosmos al macrocosmos, viaje de ida y vuelta

Álvaro De Rújula

Doctor en física teòrica, director de la Divisió de Física Teòrica del Consell Europeu per a la recerca Nuclear (CERN) a Suïssa del 1996 al 1999. Des del 1985 és membre del CERN i catedràtic a la Universitat de Boston (EUA). A partir del 2009, esdevé membre de l'Institut de Física Teòrica de la Universitat Autònoma de Madrid i del Centre d'Investigacions Energètiques, Mediambientals i Tecnològiques (CIEMAT).

Dimarts 31 d'agost

Está de moda conjeturar que hay muchos universos, siendo el nuestro simplemente uno de los posibles. Supongamos que alguien de otro universo llegara al nuestro. Se preguntaría qué contiene, y cómo funciona. Y se daría cuenta de que más sencillo, difícil: a todas las escalas, desde las más grandes a las más diminutas; todo parece funcionar de la misma manera: unos cuantos constituyentes que se comportan como «partículas» y que se mantienen en sus estructuras colectivas más o menos estables por la acción de unas pocas «fuerzas».

El récord casi absoluto de «lo más grande que tenga algo de consistencia» lo tienen los llamados «cúmulos de galaxias», compuestos de hasta algunos miles de galaxias. Estas están plagadas de estrellas, algunas –como la nuestra, la Vía Láctea– contienen varios cientos de miles de millones de estrellas.

Una fracción importante de las estrellas cercanas tiene planetas suficientemente grandes como para que los podamos detectar. Cúmulos, galaxias, estrellas, planetas y lunas se comportan (vistos desde una distancia suficiente) como partículas. La relativa estabilidad de sus conjuntos –como el sistema solar– se debe a una fuerza fundamental entre sus constituyentes: la gravedad.

Al menos en un planeta –que sería prácticamente imposible argüir racionalmente que es excepcional– hay seres vivos. Sus estructuras relativamente estables están regidas por instintos reproductivos, que los físicos no consideramos como fuerzas «fundamentales».

Tanto nosotros como los demás objetos ya citados estamos hechos de átomos. A su vez, los átomos tienen partes: electrones girando alrededor de un núcleo. Los átomos están estabilizados por otra fuerza fundamental: el electromagnetismo. Nos topamos aquí con nuestra primera partícula elemental, el electrón. Quiere esto decir que, si el electrón tiene partes, aún no lo sabemos. Es bien posible que en la búsqueda de los entes realmente «básicos», hayamos encontrado que el electrón es uno de ellos.

A diferencia del electrón, el núcleo atómico no es elemental. Los diversos núcleos están constituidos por diferentes números de protones y neutrones. A su vez, estas dos últimas partículas están hechas de dos tipos de constituyentes, llamados el *quark up* y el *quark down*. Los quarks, como el electrón, tienen, al menos en el estado actual de nuestros conocimientos, el máximo honor: son partículas elementales.

Los quarks se mantienen unidos en estructuras estables por una fuerza fundamental que llamamos «el pegamín» o, más pretenciosamente, la «fuerza cromodinámica». Su nombre es discutible: nada tiene que ver este color con los colores de la luz.

Todo lo que he dicho es verdad, en el único sentido en que la verdad es universal e indiscutible, es decir, todo ello está ampliamente comprobado observacional y experimentalmente. Hay quienes no albergan duda sobre las propiedades de entes situados más allá de lo que la ciencia nos permite constatar, por ejemplo a niveles superiores a la escala del universo, o inferiores a la de las partículas elementales. Ellos se autodefinen como gurús o profetas. La mayoría de los científicos los consideramos simplemente «chiflaos».

He hablado de objetos grandes y pequeños, todos ellos estables o cuasi-estables. Algunas partículas elementales, como el electrón, son verdaderamente estables (más precisamente: medimos que la vida media del electrón es al menos 16 órdenes de magnitud mayor que la edad del universo). Un planeta como Marte no es estable, pero varía muy lentamente. La Tierra evoluciona de manera más acelerada, últimamente por culpa nuestra. Cu-

riosamente, el mayor de todos los objetos —el universo— no es estable. Tuvo un principio y, desde entonces, crece sin parar. Y podemos asegurar que lo hará durante mucho más tiempo de lo que ya lo ha hecho.

A inicios del siglo xx Einstein creía que el Universo era estático. Preocupado por el hecho de que tendría que colapsarse debido a la atracción gravitatoria de cada galaxia sobre las demás, se le ocurrió una extraña idea: añadir a sus ecuaciones una constante cosmológica. La interpretación moderna de esta peculiar intrusa es que se trata de la densidad de energía del vacío, también llamada «energía oscura».

El vacío es lo que queda cuando hemos sacado de él todo lo que podemos sacar. ¿Entonces no queda en él nada? Este es el quid de la cuestión: las observaciones nos hacen concluir que el vacío es una sustancia consistente en algo que no le podemos sustraer. Y este algo tiene su propia energía por unidad de volumen.

Todo lo que tiene energía ejerce una acción gravitatoria, pero la energía del vacío, a diferencia de cualquier otra, es repelente. Lo que Einstein proponía es que dos «cachos» de vacío cósmico se repelerían exactamente tanto como se atraen las galaxias que contienen, resultando en un equilibrio, difícil de creer y además, inestable.

Podemos artificialmente fabricar un vacío aún más vacío que el que existe entre estrellas o cúmulos de galaxias (el vacío interestelar no es perfecto: contiene algo de materia y radiación). Pero el efecto repelente propuesto por Einstein es tan pequeño a la escala de nuestro planeta que no podemos comprobarlo directamente, solo podemos mirar al cielo.

Un día Einstein supo que el universo estaba en expansión, como si fuese el resultado de una explosión, el mal llamado Big Bang. Así lo demostraba una observación publicada por Hubble en los últimos años veinte: las galaxias se fugan: parecen estar alejándose unas de otras. Inmediatamente Einstein calificó su constante cosmológica como su mayor metedura de pata. Desde

entonces, el asunto se ha complicado algo más. Recientes observaciones demuestran que el universo está en expansión acelerada. Las galaxias no se comportan como la metralla de una bomba (como sugiere la expresión *Big Bang*), sino como cohetes a los que algo empujara. La analogía no es perfecta, porque ninguna lo es y el concepto es difícil.

Las galaxias no se están fugando, es el espacio (o el vacío entre ellas) quién se estira. Es como si alguien tomase la tierra por un globo y la inflara: mañana estarían París y Madrid aún más lejos de Andorra. Quién infla el universo sería la densidad de energía del vacío. El vacío sería pues una sustancia activa, capaz de ejercer una repulsión gravitacional, incluso sobre sí mismo. No fue todo esto un error, sino otra intuición increíble de Einstein. La observación de un universo en expansión acelerada parece haberle dado la razón, una vez más.

Si el vacío contiene algo de lo que no lo podemos vaciar (su densidad de energía), quizás ese algo pueda hacer algo más. Al menos eso supusieron, hace ya décadas, Peter Higgs, François Englert y Robert Brout. La sustancia del vacío, que llamamos un campo que lo permea, podría interactuar con las partículas que allí estén. E interactuar de modo distinto con cada tipo de partícula, generando así sus masas, que hacen que las distintas partículas sean como son. Ese es el origen de las masas en el modelo estándar de las partículas elementales, que explica con éxito insoportable sus otras propiedades e interacciones no gravitatorias.

Pocas cosas pueden parecer más vacuas que consideraciones sobre el vacío. Pero si lo que dije en el anterior párrafo es falso, lo podemos comprobar (no es posible comprobar que algo es cierto, solo que lo es hasta un determinado nivel de precisión). En el laboratorio europeo de física de partículas –el CERN, en Ginebra– ha empezado a funcionar un colisionador de protones –el llamado LHC– que, si todo va bien, tiene la capacidad de comprobar si la teoría actual sobre el vacío como sustancia responsable de las masas de las partículas va por buen camino.

Un colisionador como el LHC consiste en dos aceleradores circulares que se cruzan en varios puntos de colisión, cuatro en este caso. Es como si en una autopista anular hubiese cuatro cruces en los que se pasa de circular de un lado al otro. De hecho es aun peor, a 140 km/h, un vehículo de masa m tiene una energía una diezmillonésima superior a su energía en reposo (que es $E = mc^2$), mientras que los protones en el LHC se acelerarán hasta una energía equivalente a 7.500 veces su energía en reposo. El LHC está ubicado en un túnel circular de 24 kilómetros de longitud. Si por él circularan automóviles, el túnel serviría solo para poner multas. El sueño dorado de un alcalde que no citaré.

La violencia de las colisiones en el LHC permite crear nuevas partículas de masa M muy elevada, de nuevo porque $E = Mc^2$ y podemos convertir la energía de las colisiones en la masa de dichas partículas. Casi todos estos nuevos entes se desintegran rápidamente y existieron solo cuando el universo era extremadamente joven. Aun así, dichas partículas forman parte de lo que existe, juegan un papel en las leyes fundamentales de la naturaleza, rigieron el comportamiento del universo en su extrema niñez y, claro está, nos compete estudiarlas y entenderlas.

Al sacudir una substancia cualquiera, vibra. Las vibraciones de campos eléctricos y magnéticos, por ejemplo, son la luz. A un nivel elemental, las vibraciones son «cuantos», entes que pueden comportarse como ondas (u olas) o como partículas (o canicas): «fotones», en el caso de la luz.

Si el vacío es una substancia, la podemos también hacer vibrar. El cuanto de vibración del vacío es una partícula, hasta ahora hipotética, llamada *el bosón de Higgs*, —«el vacilón» podría decirse en castellano. No creo que a Peter Higgs le gusten otros nombres que se le dan a su engendro, como *goddamned particle* o hasta *God particle*, conceptos muy poco «british».

El LHC ha empezado ya a estudiar el vacío a lo bestia: sacudiéndolo. Haciéndolo con energía suficiente como para transformar la energía de las colisiones en *bosones de Higgs*. Será posible, con algunos años de esfuerzo,

observarlos o demostrar que no existen. Esto es factible porque, en el modelo estándar –que el descubrimiento del Higgs completaría–, dicha partícula no puede tener una masa tan elevada como para que el LHC no pueda producirla. Quizás el más revolucionario descubrimiento que con el LHC se pueda hacer es que no existen ni el Higgs ni nada que se le parezca. Esto querría decir que no hemos entendido nada, la situación ideal para jóvenes científicos. La dificultad consistiría en convencer a los políticos de que el fracaso de nuestras promesas es en realidad un gran éxito, como lo es –según ellos– el incumplimiento de las suyas.

El vacío siempre fascinó a los físicos. Hace un siglo se trataba del éter, la interpretación del vacío como la trama del espacio absoluto, que la teoría de la relatividad envió al garete. El éter no estaba apoyado por ninguna teoría decente. Un siglo después, las nuevas teorías del vacío son lo más razonable y mejor comprobado que tenemos. Pero hay al menos un pequeño gazapo en lo que he dicho. Creemos entender el modelo estándar suficientemente bien como para estimar cuanto el campo de Higgs debería contribuir a la densidad de energía del vacío observada por los cosmólogos. El resultado es unos 54 (¡cincuenta y cuatro!) órdenes de magnitud superior a las observaciones. Tiene su mérito incurrir en tamaña contradicción.

Si investigamos es porque no sabemos la respuesta y la naturaleza sí: las cosas son como son. El vacío es lo que mejor no entendemos, tanto al nivel cosmológico como al elemental. Ni siquiera comprendemos aún a fondo la diferencia –haberla hayla– entre el vacío y la nada. El tener bien claro lo que no sabemos (o aceptamos) es un primer paso hacia una buena revolución. En el terreno de la ciencia, todas lo son.



Impacte de la biotecnologia en el món d'avui

Magda Marquet Mandicó

Doctora en enginyeria bioquímica, pionera de la biotecnologia a Califòrnia. Fundadora i copresidenta dels laboratoris Althea Technologies, Althea Diagnostics i Alma Life Sciences de San Diego (EUA), membre fundador de l'Institut Pitzer Vaccine (Califòrnia i Botswana) i presidenta de la Fundació Maria Mandicó i Benet Marquet. Premi Entrepreneur of the Year, 2005.

Dimecres 1 de setembre

El món d'avui i la crisi

A més de la crisi econòmica que estem vivint actualment, el món es troba en una situació mai vista fins ara. La població mundial ja ha arribat als set bilions de persones i les projeccions són de nou bilions per a l'any 2050. La desproporció entre països pobres i països rics continua creixent. Les malalties infeccioses encara afecten el 80% de la població mundial i l'obesitat ha esdevingut l'epidèmia del segle XXI. Depenem massa de l'energia fòssil i això crea conflictes arreu del món, contamina i té una relació directa amb l'escalfament del planeta. El cost de la salut als països occidentals, sobretot als Estats Units, està fora de control i la manera de produir medicaments és antiquada i no resol problemes sanitaris globals. Tots aquests problemes són molt greus i poden semblar insuperables...

En aquests moments vivim una crisi molt important, segurament la més gran des dels anys 1930, i la paraula ja és corrent en les converses diàries de tothom. La paraula «crisi» en xinès es compon de dos caràcters, un significa «perill» i l'altre, «oportunitat». Potser hauríem de mirar la crisi actual amb uns ulls diferents, pensant que tots els problemes que estem vivint ens donen oportunitats per fer canvis i arribar a solucions millors.

Medicina, nutrició i biocarburants

La biotecnologia pot aportar solucions creatives a tots aquests problemes. La seva aplicació té impacte sobretot en el camp de la medicina, a la qual proporciona nous mètodes més eficaços i potents per prevenir, diagnosticar i curar malalties. També en el món de l'alimentació es poden crear plantes

transgèniques amb propietats diferents dels organismes parentals. Aquest tema és molt controvertit, sobretot a Europa, però jo penso que és la manera d'assegurar que els països en desenvolupament es puguin beneficiar d'una alimentació adequada. Per exemple, es pot produir arròs amb una proporció de proteïna suficient per aportar una nutrició completa a poblacions que malauradament pateixen de malnutrició. També s'han desenvolupat vacunes comestibles que podrien fer que els programes de vacunació es fessin senzillament menjant un plàtan o un brot d'alfals.

Tampoc no podem oblidar la producció de biocarburants, per exemple, a base d'algues. Aquest procés no solament genera biocarburants que poden reemplaçar el petroli de manera econòmica, sinó que també pot aportar nutrients que es poden utilitzar per a l'alimentació dels animals. És a dir, quan es fa la collita de les algues, tot es pot utilitzar d'una manera o d'una altra per crear energia o nutrients, sense provocar cap mena de contaminació... El setanta per cent de la Terra és cobert d'aigua salada, per tant té sentit utilitzar l'aigua salada per produir matèries primeres per a combustibles, productes químics, plàstics i altres materials com el menjar per als animals. Crear biocombustibles a partir d'algues cultivades en aigua de mar és l'única alternativa als combustibles fòssils que no compromet l'agricultura i la utilització d'aigua fresca.

Breu història de la biotecnologia

Però, què és exactament la biotecnologia? La biotecnologia és l'aplicació tècnica de les ciències naturals o de la biologia. Existeix, d'alguna manera, des de fa molt temps. Podríem dir que els criadors d'animals de la prehistòria, quan es van adonar que diferents trets físics podien potenciar-se o desaparèixer aparellant els animals, van inventar la biotecnologia. Quan els sumeris, fa uns 6.000 anys, van descobrir de manera accidental la fabricació de la cervesa, van demostrar ser uns biotecnòlegs genials! I així també, totes les civilitzacions que van aplicar la fermentació del raïm per fer vi i la

de la llet per fabricar formatge utilitzaven principis de biotecnologia sense saber-ho, fins que, al segle XIX, Pasteur va identificar el paper dels micro-organismes en el procés de fermentació. En el meu cas, es pot dir que he estat en el sector de la biotecnologia tota la vida, ja que els meus padrins, els meus pares, el meu germà i els meus nebots es dedicaven, i es continuen dedicant, al negoci del vi!

Les aplicacions mèdiques

1. Proteïnes recombinants

La biotecnologia tal com l'entenem avui existeix des de fa uns trenta-cinc anys, quan Herb Boyer, un científic de la Universitat de Califòrnia a San Francisco, i Bob Swanson, un *venture capitalist* amb idees originals, van anar a prendre una cervesa i en una conversa casual van decidir crear una empresa, Genentech, amb la idea de produir proteïnes recombinants (a base d'ADN recombinant) per substituir proteïnes que s'obtenien amb l'extracció d'òrgans. L'ADN recombinant és una molècula d'ADN artificial que es crea mitjançant la combinació de dues o més seqüències d'ADN que normalment es troben en espècies diferents a través del procés d'empalmament gènic (*gene splicing*). Es crea a través de la introducció d'un ADN portador de les característiques desitjades en un ADN d'organismes existents, com els plasmidis de bacteris, per convertir o alterar les seves característiques amb un propòsit específic, com ara produir organismes resistents als antibiòtics. Es diferencia de la recombinació genètica perquè no es produeix a través de processos naturals en la cèl·lula, sinó que està dissenyada. Una proteïna recombinant és una proteïna que s'obté a partir de l'ADN recombinant.

La tecnologia de l'ADN recombinant ha estat possible gràcies al descobriment, l'aïllament i l'aplicació d'endonucleases de restricció per part de Werner Arber, Daniel Nathans i Hamilton Smith, pels quals van rebre el 1978 el premi Nobel de Medicina. Cohen i Boyer van patentar, l'any 1974,

el procés de producció de quimeres moleculars biològicament funcionals que no podria existir a la natura. La patent els va ser concedida el 1980.

Aquestes tècniques, que han esdevingut rutina en laboratoris d'arreu del món, eren realment revolucionàries. La primera proteïna recombinant que es va comercialitzar va ser l'hormona del creixement, fa exactament 25 anys. Abans de l'any 1985, l'única opció que tenien els nens i adolescents que necessitaven tractament d'hormona del creixement era l'extracció d'aquesta hormona a partir de glàndules pituïtàries de cadàvers. Es necessitaven més de cent glàndules només per produir la dosi anual per a un pacient i això comportava una manca de tractaments. A la producció d'hormona del creixement la van seguir moltes altres proteïnes recombinants. Per exemple, abans de les proteïnes recombinants, per al tractament de la diabetis de tipus I s'havia d'extreure la insulina de pàncrees de porc o de vaca i se'n necessitaven uns quants quilos per tractar un pacient. Aquest mètode no solament era antiquat, onerós i difícil, sinó que representava un risc per al pacient, ja que els pàncrees podien estar contaminats amb virus que es podien transmetre al pacient i podien crear més problemes que aportar solucions. Actualment, la societat Lilly ha comercialitzat la producció d'insulina recombinant.

Genentech ha tingut un èxit fenomenal des del punt de vista tècnic i financer. Ha creat tractaments innovadors per a moltes classes de malalties, sobretot el càncer, i es va vendre a la societat suïssa Roche per vuitanta mil milions de dòlars el mes d'abril de 2010.

2. *Anticossos monoclonals*

Al principi, la biotecnologia s'aplicava per produir proteïnes que ja existien en la natura, però més tard es va aplicar a la producció d'entitats totalment noves, com per exemple els anticossos monoclonals. La tècnica de l'hibridoma per a la producció d'anticossos monoclonals és un dels avenços metodològics més importants en biomedicina durant la dècada de 1970. Una cèl·lula productora d'anticossos i totes les seves cèl·lules filles produeixen

una molècula d'anticòs idèntica (anticossos monoclonals). Durant molt de temps, els científics van tenir l'esperança que arribaria a ser possible produir anticossos monoclonals amb especificitat per defecte específic, podent així centrar el tractament a una malaltia concreta. Aquest somni es va fer realitat el 1975, quan Georges J. F. Köhler i César Milstein (premis Nobel de Medicina 1984) van descriure la tècnica de l'hibridoma per a la producció d'anticossos monoclonals. Van immortalitzar cèl·lules productores d'anticossos mitjançant la seva fusió amb cèl·lules tumorals. Aquest mètode permet la producció il·limitada d'anticossos monoclonals amb especificitat per defecte. Els anticossos monoclonals han obert completament nous camps per a la recerca biomèdica teòrica i aplicada i permeten un diagnòstic precís i també el tractament de la malaltia. Aquest descobriment va ser explotat ràpidament per diverses empreses, una de les quals era la companyia Hybritech de San Diego, Califòrnia.

3. *Vacunes*

La utilització de vacunes data de finals del segle XVIII, quan Edward Jenner, un científic anglès, va observar que les muniydores que tenien butllofes vermelles a les mans, un senyal que estaven infectades pel virus de la verola de les vaques, no agafaven la verola humana. La verola era una malaltia molt greu i durant molts segles va devastar la humanitat. El doctor Jenner va tenir la idea d'inactivar el virus de la verola de les vaques i d'injectar-lo als humans per protegir-los contra la verola. Així, Jenner va crear la primera vacuna de la història de la medicina i es va convertir en el pare de la immunologia. Els treballs de Jenner han salvat més vides que la feina de qualsevol altra persona.

Un segle més tard, Louis Pasteur va provar per primera vegada en l'home la seva vacuna pionera contra la ràbia. Va salvar la vida d'un jove anomenat Joseph Meister, que havia estat mossegat per un gos rabiós. La ràbia continua sent un problema important avui. La reserva àmplia del virus de la ràbia en animals salvatges com guineus i óssos rentadors fa que el control de la malaltia sigui molt difícil. Les vacunes existents per als éssers humans

són extremament cares, i això sempre ha evitat qualsevol ús preventiu a gran escala, especialment en els països on la ràbia és encara un important problema de salut.

A més de la producció d'hormones i proteïnes farmacèuticament importants, la producció de vacunes recombinants s'ha convertit en un objectiu important en la biomedicina. Fins fa poc més de vint anys, totes les vacunes eren inactivades o soques innòcues del virus. Després de la injecció d'aquests virus inactivats en un ésser humà, es produeixen els anticossos contra aquest virus, cosa que fa aquesta persona resistent al virus real. No obstant això, la inactivació viral en la producció de vacunes era sovint incompleta, i la vacunació pot comportar alguns riscos. L'enginyeria genètica, que produeix proteïnes en microorganismes, és una bona alternativa a la producció de vacunes, més segura que la tècnica tradicional. La injecció d'aquestes proteïnes també dóna lloc a la producció d'anticossos i, per tant, a la immunitat al virus. L'avantatge obvi d'aquest enfocament és en gran mesura millorar la seguretat de la vacuna. S'estan fent molts avenços en el desenvolupament de vacunes recombinants, però com que es necessiten uns quants anys d'assajos clínics i aprovació, fins ara el nombre de productes al mercat és força limitat. Les històries d'èxit en la lluita contra les malalties virals en éssers humans inclouen el desenvolupament d'una vacuna recombinant contra l'hepatitis B i també una vacuna contra el virus del papil·loma humà per a la prevenció del càncer de cèrvix. No obstant això, el camp de la vacuna recombinant també ha topat amb una sèrie de dificultats relacionades, com ara la selecció correcta d'antígens recombinants per al sistema immunològic o el temps de vida limitat de proteïnes en el cos humà.

Una altra tècnica innovadora d'immunització és la utilització de vacunes d'ADN. Consisteix en la injecció directa de material genètic en el pacient i fa que una petita quantitat de les seves cèl·lules produeixi els productes dels gens introduïts. Aquesta expressió inadequada dels gens en el pacient té conseqüències immunològiques importants i comporta l'activació immunològica específica de l'hoste contra el gen de l'antigen lliurat. Aquestes vacunes estan avaluades en estudis clínics en diverses malalties com la sida,

la grip i la malària. L'empresa Vical, amb seu a San Diego, Califòrnia, on jo vaig treballar durant els anys noranta, és pionera en aquesta tecnologia.

Per a algunes malalties que representen problemes molt greus per a la humanitat, com ara la sida, encara no s'ha trobat cap vacuna eficaç, malgrat l'esforç mundial monumental de recerca. Malauradament, sembla que el desenvolupament d'una vacuna contra la sida ha de seguir un camí llarg i complex abans no se'n trobi una d'eficaç. Això es deu sobretot a la gran capacitat de mutació del virus de la sida.

Els esforços d'investigació han augmentat dràsticament en aquesta àrea tant en la indústria com a les universitats i potser podran contribuir a reduir el temps necessari per obtenir la vacuna, però això no ajuda els pacients amb sida (la majoria en el món en desenvolupament), que hauran de continuar dependent de drogues com ara els anàlegs de nucleòsids i, en particular, inhibidors de la proteasa, que són cada vegada més eficaços, per cert, però que no són assequibles a la majoria dels afectats (excepte els del món desenvolupat).

4. Pitzer Vaccine Institute

Tal com he comentat al principi de la meva ponència, hem de buscar solucions creatives i tenim la responsabilitat de trobar maneres de resoldre problemes sanitaris de països en desenvolupament. És clar que molts dels mètodes que s'utilitzen a Europa o als EUA no es poden transportar a fora perquè són complicats i onerosos. En aquest sentit, voldria parlar del Pitzer Vaccine Institute. Aquest institut, dirigit pel professor Larry Grill i situat a Claremont, Califòrnia, produeix vacunes utilitzant el tabac. Havent nascut a Cal Ton de Borró de Canillo, on cultivàvem i encara cultivem tabac, aquest concepte em va intrigar molt i vaig decidir amb el meu marit, François Ferre, participar en la creació de l'institut. Aquest institut col·labora amb la Universitat de Botswana per crear vacunes. Té un objectiu sanitari i tecnològic, però també un objectiu educatiu, ja que dona la possibilitat a estudiants de Botswana d'anar a fer recerca als EUA i també a estudiants

americans d'anar a dissenyar experiments a l'Àfrica en un entorn molt diferent del que estan acostumats.

Penso fermament que, si és possible, la prevenció és millor que la cura, i la producció de vacunes és una manera molt eficaç de prevenir i controlar problemes epidèmics. Com un projecte pilot inicial, l'institut està desenvolupant un sistema de producció d'una vacuna contra la dermatosi nodular contagiosa (*lumpy skin disease*), que causa una debilitat crònica en bovins comparable a la febre aftosa i comporta greus pèrdues econòmiques. A Botswana, quan una família té una vaca, es considera una família rica. Però si la vaca té aquesta malaltia, s'ha d'exterminar de seguida, perquè és una malaltia molt contagiosa. Si la família perd la vaca, ho perd tot i té un futur molt difícil. Per això, aquesta malaltia té repercussions molt greus per al país.

També estem desenvolupant la vacuna per la infecció del rotavirus, responsable de la mort de 600.000 infants cada any en països en desenvolupament. La tecnologia de la vacuna es basa en l'ús d'un virus comú, el virus del mosaic del tabac (TMV), que no causa malaltia en les espècies no vegetals. Aquest virus de la planta del tabac és infecciós només en aquesta espècie i és fàcil de contenir i controlar quan les plantes es cultiven a l'aire lliure. A més de la capacitat de producció ràpida i a baix cost, un altre avantatge d'aquestes vacunes és que és probable que puguin ser emmagatzemades a temperatura ambient en forma de pols seca que pot ser hidratada just abans de la inoculació, de manera que la cadena de fred en el control de la vacuna és una preocupació menor.

La producció de vacunes a partir de la planta del tabac és molt eficaç. S'utilitza el virus del mosaic del tabac al qual s'incorpora la seqüència de la vacuna que es vol produir. Una setmana després d'inocular el virus a les plantes de tabac, les plantes produeixen una gran quantitat de vacuna que llavors només s'ha d'extreure i purificar. El procés sencer es pot fer en unes sis setmanes. És relativament fàcil, econòmic i dona molts rendiments. Si es compara aquest procés amb la producció tradicional de vacunes a base

d'ous, que és difícil d'automatitzar, llarga (un mínim de sis mesos), subjecta a contaminació i molt antiquada, és molt clar que la producció a partir del tabac és molt atractiva. Com tot producte que s'utilitza en humans, s'han de fer proves clíniques per demostrar-ne la seguretat i l'eficàcia, i això demana anys d'investigació clínica.

Penso que també podria ser un bon projecte per a Andorra. Una vegada més, si pensem de manera creativa i veiem oportunitats en la crisi actual, aquesta podria ser una manera de transformar les plantacions de tabac andorranes en una indústria nova, no contaminant i adaptada al país.

El projecte Genoma humà

Ara voldria comentar la transformació de la medicina d'una medicina global a una medicina individualitzada. Fa deu anys es va publicar el mapa del genoma humà. Va ser un esforç global que va implicar múltiples països i que va tenir molt impacte en el món científic, i està considerat un *breakthrough*. Després d'una dècada, s'han fet gairebé cent associacions entre gens i malalties específiques. Però encara no hem vist els fruits d'aquesta revolució científica i continua havent-hi dificultats per transformar la informació en projectes complets. Per què? La descodificació del genoma humà comporta analitzar tres mil milions de parells de bases, i la primera vegada que es va fer, el 2003, va durar deu anys, però ara es pot aconseguir en un sol dia! Això crea una acumulació de dades fenomenal i aquesta informació s'ha de poder digerir abans de trobar-hi aplicacions concretes.

Medicina individualitzada

Ara us voldria donar un exemple d'una d'aquestes aplicacions de la descodificació del genoma humà. És un treball que hem fet a Althea, una societat amb seu a San Diego, Califòrnia, que vaig fundar amb François Ferre l'any 1998. Vam fer aquesta recerca en col·laboració amb el National Cancer Ins-

titute de Washington DC. Aquest treball consisteix a trobar biomarcadors per al càncer, i més concretament a diferenciar les cèl·lules petites, blaves i rodones cancerígenes entre els infants. Hi ha quatre tipus de càncers pediàtrics que són molt difícils de distingir pels metges amb la utilització de tècniques de patologia tradicionals. Aquestes cèl·lules petites, blaves i rodones cancerígenes necessiten un tractament absolutament diferent de les altres; algunes necessiten un tractament de quimioteràpia dràstic i agressiu i d'altres no necessiten cap mena de tractament. Vam poder diferenciar, a partir d'una base global de dades genètiques, els diversos tipus de càncers. Vam identificar trenta-tres gens implicats en les quatre formes de tumors cancerígens diferents. Aquests gens permeten als metges distingir els diferents tipus de càncer (sarcoma d'Ewing, limfoma de Burkitt, rabdomiosarcoma, neuroblastoma) de manera precisa i els ajuden a trobar el tractament apropiat i individualitzat per tractar-los. Aquest exemple il·lustra que l'expressió genètica diferencia amb èxit els càncers infantils i que condueix a un tractament individualitzat per a l'infant, menys tòxic i més eficaç.

El desenvolupament de la medicina individualitzada és una gran transformació de la medicina actual. A primera vista, la idea de la medicina individualitzada pot no semblar nova. Al cap i a la fi, no han donat sempre una atenció individualitzada, els metges? Es reuneixen amb el pacient individualment, pregunten sobre la seva salut i agafen mostres de la seva sang per mesurar les hormones, el colesterol i les quantitats i els tipus de cèl·lules en la sang. Si un medicament prescrit no és efectiu per tractar una malaltia, es canvia a un altre de diferent. No és individualitzada, la medicina? Potser sí; però no de la manera com ho podria ser actualment, amb tota la informació genètica disponible.

Avui, quan la gent es refereix a la «medicina individualitzada», en general ho fa en el context de la utilització de la genòmica, la ciència que veu tota la informació en el genoma d'una persona per poder desenvolupar tractaments específics segons la composició genètica del pacient. L'ADN en el genoma humà codifica la informació amb les instruccions per construir i mantenir totes les peces moleculars que componen el cos humà. En general, hi ha

prop de tres mil milions de lletres, en el conjunt d'instruccions. Quan els tres mil milions de lletres d'un ésser humà individual es comparen amb els d'una altra persona no relacionada, hi ha alguna cosa així com tres milions de diferències. Aquests tres milions de diferències contribueixen de manera significativa al que fa els individus únics. Un exemple molt tangible és la semblança física que es veu sovint entre pares i fills, perquè els nens comparteixen gran part de la seva variabilitat genètica amb els seus pares. I és per això també que hi ha algunes malalties en certes famílies.

Una de les idees que hi ha al darrere del Projecte Genoma Humà és que pugui donar lloc a tractaments que podrien adaptar-se millor a cada persona. En «llegir» la seqüència d'ADN d'un individu, de vegades és possible predir si aquesta persona respondrà o no com s'espera a un medicament determinat. Aquesta informació es té en compte quan un medicament es prescriu com un tractament. Per exemple, durant els últims anys s'han utilitzat drogues específiques, com ara Gleevec, Herceptin, Iressa i Tarceva, per tractar la leucèmia i els càncers de mama i de pulmó, i han demostrat ser més beneficioses en un subgrup de pacients amb determinades variacions genètiques. En aquests casos, els pacients són avaluats abans que se'ls prescrigui el fàrmac.

El desenvolupament de la medicina individualitzada requereix que el món de la recerca terapèutica col·labori amb el món de la recerca diagnòstica. En la indústria farmacèutica tradicional, aquests són dos mons molt separats que no es comuniquen entre ells. Però és molt clar que per poder prescriure una medicina adequada s'ha de poder identificar la composició genètica del pacient. La teranòstica és la fusió entre teràpia i diagnòstic en la forma d'una prova d'ADN per predir tant la resposta del pacient a la droga com la selecció de la subpoblació de pacients per a assaigs clínics. La teranòstica aplanarà el camí per a la medicina individualitzada. Això implica l'ús de les proves moleculars per determinar la dosi òptima de fàrmac per a la persona adequada en el moment adequat. Encara que s'hagin començat a veure aplicacions de la medicina individualitzada, el seu veritable potencial encara

s'ha de descobrir. Factors com el cost i els terminis reglamentaris són els obstacles principals que s'han d'abordar en aquest moment.

Tots aquests canvis dràstics en la medicina, com la contribució cada vegada més gran de teràpies biològiques provinents de la recerca en biotecnologia i que reemplacen a poc a poc les teràpies químiques del món farmacèutic tradicional, i també el tractament individualitzat del pacient, són necessaris, ja que el sistema actual de descoberta de tractaments nous està antiquat i ja no funciona. Penseu que calen més de deu anys i més de mil milions d'euros per descobrir i comercialitzar un medicament nou! Si un comença la recerca amb deu mil components, té molta sort si al cap de deu anys té un producte farmacèutic.

La convergència de tecnologies tindrà un paper molt important en la medicina del futur. La bioinformàtica i la nanotecnologia han plantejat noves oportunitats en els camps emergents de la medicina personalitzada (en què la malaltia, la detecció, el diagnòstic i la teràpia s'adapten al perfil molecular de cada individu) i la medicina predictiva (en què s'utilitza la informació genètica i molecular per predir el desenvolupament de la malaltia, la progressió i el resultat clínic). En aquest cas, parlem d'eines avançades de bio-informàtica per al descobriment de biomarcadors de càncer i de sondes de multiplexació de nanopartícules per crear perfils de biomarcadors de càncer, a més de les perspectives i els reptes que implica la correlació de signatures biomoleculares amb el resultat clínic. Aquesta convergència de bio-nano-info és una gran promesa per al diagnòstic molecular i la teràpia individualitzada del càncer i altres malalties humanes.

Ciència i societat

Es diu que el segle xx ha estat el segle de la física i que el segle xxi serà el segle de la biologia. Penso que les aplicacions de la biotecnologia dominaran les nostres vides durant els propers cinquanta anys com a mínim, tant com les aplicacions dels ordinadors han dominat les nostres vides durant

els cinquanta anys anteriors. Ja estem recollint els fruits de descobriments com les proteïnes i les vacunes recombinants i el començament de la medicina individualitzada gràcies a la convergència de la informàtica, la biotecnologia i la nanotecnologia. També mirem amb curiositat i sorpresa el poder de les cèl·lules mare i de les seves nombroses aplicacions. Les cèl·lules mare tenen un potencial notable per convertir-se en molts tipus diferents de cèl·lules, com una cèl·lula muscular, un glòbul vermell o una cèl·lula del cervell. Amb totes aquestes característiques, és fàcil d'imaginar que un dia es pugui fer un òrgan nou com ara un cor o un fetge i que un cos humà es pugui rejuvenir com un cotxe que es porta al taller mecànic per canviar-li el motor... També veiem el progrés ràpid que s'està fent en el desenvolupament de biocarburants a base d'algues, i recentment hem vist la publicació de la primera cèl·lula amb un cromosoma artificial. Al laboratori de Craig Venter (Premi Carlemany, Andorra 2008) s'ha creat una nova forma de vida, i l'era de la biologia sintètica ha començat. Té un risc, sens dubte. Però gairebé totes les tecnologies es poden utilitzar per a mal o per a bé, tant els patògens que s'utilitzen per fer una vacuna, com la radioactivitat o fins i tot la roda. Aquesta invenció obre les portes per crear nous cultius, nous combustibles, noves formes d'investigar les malalties i nous medicaments per tractar-les. Però sia les cèl·lules mare o els cromosomes artificials, totes aquestes proeses tecnològiques plantegen preguntes ètiques. Quan comença la vida? Quin dret té el científic a jugar amb cèl·lules mare o a crear vida amb gens sintètics? Aquestes preguntes fan que el món científic i el món religiós sovint es confrontin i moltes vegades això també desemboca en posicions polítiques que tenen molta influència en el desenvolupament de la ciència, com la posició de l'anterior administració americana de George W. Bush davant la recerca en les cèl·lules mare embrionàries, que el Govern americà no va subvencionar. Però, últimament, és responsabilitat de la societat fer que la ciència avanci al més ràpid i al millor possible protegint l'individu i controlant les aplicacions tecnològiques.

Com que sóc optimista de mena, penso fermament que els beneficis de la biotecnologia podran superar de lluny els seus potencials efectes negatius o fins i tot perillosos. És molt clar que el coneixement en aquest camp els

últims deu anys ha augmentat de manera exponencial i que aquest exponent s'accelera. Qui hauria pogut predir, fa només deu anys, que podríem fer òrgans artificials gràcies a les cèl·lules mare? La convergència de diverses tecnologies obre noves àrees i crearà invencions que encara no ens podem ni tan sols imaginar.



L'Homme à la recherche de nouveaux mondes

Sylvie Vauclair

Astrofísica, doctora en ciències físiques, investigadora a l'Observatori Migdia-Pirineus, catedràtica a la Universitat de Tolosa des del 1981 (després de dotze anys d'ensenyament a la Universitat de París) i membre sènior de l'Institut Universitari de França. Membre de l'Acadèmia de l'Aire i de l'Espai i de l'Academia Europaea. Premi del llibre científic d'Orsay (2002) i Gran Premi dels Amics de la Cité de l'Espace (2009).

Dimecres 1 de setembre

Introduction : sciences et sociétés

Nous vivons une époque exceptionnelle de l'histoire de l'humanité. Pour la première fois depuis l'aube des temps, des êtres vivant sur la planète Terre ont appris à s'en échapper. Ils ont réussi à aller dans l'espace, au-delà de l'atmosphère terrestre, aussi loin que la Lune. Ils iront bientôt sur la planète Mars. De plus, ils envoient des instruments, satellites, sondes spatiales, robots animés avec des caméras de télévision qui nous renvoient les images lointaines qu'ils ont directement observées. Ces petits robots se retournent aussi parfois vers nous et nous présentent alors l'image de notre planète, la Terre, observée dans leur ciel à eux comme un petit point bleu perdu dans l'immensité.

Il est impossible de rester indifférent à une telle révolution. Les hommes et les femmes vivant sur la planète Terre ne peuvent plus se considérer eux-mêmes de la même manière que lorsqu'ils se croyaient sur un sol fixe, quand l'immensité céleste tournait autour d'eux. Nous sommes tous habitants d'un vaisseau spatial tournant à grande vitesse autour d'une petite étoile perdue au sein d'une immense galaxie, dans un univers sans fin.

En 2009, l'année mondiale de l'astronomie commémorait les 400 ans de la première lunette astronomique de Galilée. Même si la lunette existait déjà depuis quelque temps, Galilée eut l'idée originale de la pointer vers le ciel et d'étudier ainsi les objets célestes. Il découvrit des montagnes sur la Lune, des taches sur le Soleil, des satellites autour de Jupiter, il découvrit aussi que la planète Venus n'apparaissait pas toujours ronde mais présentait des « phases », autant d'observations qui allaient dans le sens logique d'une

Terre planète, tournant autour du Soleil comme les autres, selon le modèle de Copernic.

Ce fut une révolution énorme car les sociétés européennes étaient imprégnées de la philosophie d'Aristote, selon laquelle la Terre, qui se trouvait au centre du monde, était le siège à la fois du bien et du mal, ainsi que du changement, alors que le monde céleste, au-delà de la lune, était parfait et immuable. Il est intéressant de constater à quel point les idées d'Aristote ont ensuite influencé la religion chrétienne. Galilée en a beaucoup souffert, il a été obligé de se rétracter, mais cela n'a pas empêché l'évolution des connaissances scientifiques de continuer allègrement. Les lunettes ont été améliorées, de grands télescopes ont été construits, les découvertes de Galilée confirmées et même bien au-delà...

Il existe de nombreux autres exemples dans l'histoire de l'humanité : les sociétés humaines, même si elles le souhaitent, peuvent ralentir occasionnellement l'évolution de la connaissance, mais ne peuvent pas l'empêcher. La recherche d'une meilleure compréhension du monde dans lequel nous vivons et dont nous sommes issus fait partie des objectifs fondamentaux de l'humanité.

Au-delà de la révolution copernicienne

Au moyen Âge, les planètes (astres errants) étaient au nombre de sept, incluant la Lune et le Soleil : dans l'ordre la Lune, Mercure, Venus, le Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, et enfin le firmament, sphère céleste portant les étoiles. Cette suite de planètes est à l'origine du nom des jours de la semaine : le Soleil étant reconnu comme particulier, on comptait les planètes en commençant par la première, puis on sautait à la première après le Soleil. Retour à la deuxième puis la deuxième après le Soleil, etc. Ce qui donne : Lune, lundi, Mars, mardi, Mercure, mercredi, Jupiter, jeudi, Venus, vendredi, Saturne, samedi, puis le jour du Soleil et du Seigneur, dimanche, Sunday, Sonntag.

Les planètes avaient des muses attitrées : il y avait en tout neuf muses, ce qui permettait d'en attribuer sept pour les planètes, une pour la Terre (Thalie, muse de la comédie) et une pour le firmament (Uranie, muse de l'Astronomie). Elles avaient aussi chacune une note de musique, ce qui représentait les sept notes de la gamme de Pythagore (la Terre, immobile, ne bénéficiait pas de notes car la musique était associée au mouvement). La révolution copernicienne a donné un coup de pied dans ce bel édifice : la Terre a cessé d'être le centre du monde pour laisser sa place au Soleil.

Nous sommes à présent bien au-delà de l'image copernicienne du monde. Il a fallu attendre le début du xx^e siècle pour comprendre que le Soleil est une étoile semblable aux autres, sans caractéristique particulière autre que d'héberger la planète Terre dans son sillage, planète qui nous concerne tout particulièrement ! Le Soleil fait partie des 200 milliards d'étoiles qui constituent la Voie Lactée, notre Galaxie. Il n'en est pas le centre, mais se trouve plutôt vers la périphérie. Il y a des milliards de milliards de galaxies comme la nôtre dans l'Univers.

Le Soleil tourne autour du centre galactique, à une vitesse d'environ 250 km par seconde. Quand la Terre fait un tour complet, en une année, autour du Soleil, celui-ci s'est déplacé dix fois plus vite dans la Galaxie. On est très loin de l'image d'une Terre qui décrit une ellipse et revient au même endroit au bout d'un an. Dans la Galaxie, la trajectoire de la Terre ressemble davantage à un gigantesque tire-bouchon très étiré vers l'avant. Elle ne repasse jamais au même endroit.

La représentation du système solaire a elle-même beaucoup évolué depuis le modèle copernicien. Si je pose la question : « qu'est-ce que le système solaire ? », on me répondra sans doute que c'est « un ensemble de planètes qui tournent autour du Soleil ». Mais en réalité, le système solaire, c'est beaucoup plus que cela. Il faut l'imaginer comme un immense disque constitué de milliards de petits objets et qui s'étend presque jusqu'aux étoiles les plus proches. Il est entouré d'une sorte de halo sphérique, les « nuages de Oort »,

réservoir de comètes. Les orbites des planètes se situent à l'intérieur de ce disque.

À présent, nous savons que le système solaire n'est pas unique. Il existe dans l'espace de très nombreux systèmes stellaires, avec des étoiles entourées de planètes de toutes sortes. La question « sommes-nous seuls dans l'Univers ? » est devenue un véritable sujet d'étude scientifique. Le vertige est immense.

Formation et disparition des systèmes planétaires

Le ^{xx}e siècle a permis des observations impossibles auparavant, grâce à la conquête spatiale. Les scientifiques ont construit des instruments capables d'observer la naissance d'étoiles entourées de leur disque « proto-planétaire », disque de gaz et de poussières au sein duquel se forment les futures planètes. L'observation doit se faire en rayonnement infrarouge, car les jeunes étoiles entourées de leurs cocons ne se révèlent pas dans les longueurs d'ondes des rayonnements visibles à l'œil. Il faut donc envoyer ces instruments dans l'espace, à bord de satellites, car la plupart des rayons infrarouges sont arrêtés par l'atmosphère terrestre et n'arrivent pas jusqu'au sol. Un autre apport fondamental dans ce domaine est le développement de l'informatique. Avant les premiers ordinateurs, il était impossible de résoudre les équations qui permettent de comprendre l'intérieur des étoiles. Par ailleurs, l'informatique conduit à développer des expériences numériques qui permettent de mieux comprendre la naissance des systèmes planétaires.

La formation d'une étoile entourée d'un disque de gaz et de poussières, susceptible d'évoluer en planètes, est un phénomène courant dans l'espace. Tout se passe dans ces grands nuages de gaz que l'on appelle des nébuleuses, comme par exemple la nébuleuse d'Orion. Ces grands nuages sont très mouvementés, ils sont le siège d'ondes de chocs, de turbulences parfois supersoniques, et ils tournent, comme tout ce qui se trouve dans les

galaxies. Lorsqu'un nuage qui tourne se condense sous l'effet d'une compression locale, il prend naturellement la forme d'un disque avec un renflement au centre. Par la suite, la partie centrale enfle et devient sphérique. Elle s'échauffe dans ses régions centrales, et peut éventuellement atteindre des températures de fusion nucléaire. Elle se stabilise alors et devient une étoile. Pendant ce temps, dans le disque, les particules s'entrechoquent et s'agglomèrent. Elles forment des petits cailloux et rochers qui, à leur tour, peuvent se coller entre eux comme des boules de neige, à l'occasion des chocs. C'est ainsi que s'est formé le système solaire, voici quatre milliards et demi d'années.

Les planètes ne restent pas généralement à l'endroit où elles se sont formées au départ. Elles effectuent des migrations vers l'étoile ou, au contraire, vers l'extérieur. Dans le système solaire, Jupiter et Saturne ont bougé, la première vers l'intérieur, la seconde vers l'extérieur. Et puis les « petits corps » du système solaire ont beaucoup voyagé. Les comètes par exemple, qui se situent loin vers l'extérieur dans les nuages de Oort, se sont formées beaucoup plus près du Soleil et ont été éjectées vers l'extérieur au début de l'existence du système solaire. À présent, leur orbite est parfois perturbée et elles peuvent revenir près du Soleil. Il se produit alors un dégazage des roches qui conduit aux queues caractéristiques.

Qu'advient-il par la suite ? Le Soleil n'est pas éternel, pas plus que les autres étoiles. Il lui reste cinq milliards d'années à vivre. Ensuite, il deviendra une belle nébuleuse. Son cœur actuel se refroidira petit à petit et donnera une toute petite étoile appelée « naine blanche » alors que ses régions périphériques enfleront et engloberont toutes les orbites actuelles des planètes. Tout ceci se passera lentement, tranquillement. En revanche, les étoiles plus grosses que le Soleil explosent à la fin de leur existence, en quelques heures. Ce sont les supernovae. Elles sont le siège de réactions nucléaires violentes qui transforment la matière. Ensuite, cette matière est dispersée dans la Galaxie et donne naissance à d'autres étoiles, entourées de leur disque. Sans ces processus nucléaires, nous ne pourrions pas exister aujourd'hui sur la Terre : le nuage d'origine, d'où ont émergé le Soleil et le

disque qui a donné naissance aux planètes dont la Terre, contenait déjà les éléments dont nous sommes faits.

Exoplanètes : il y a quelqu'un ?

Le Soleil est une étoile comme les autres et possède des planètes. Il était donc logique de penser qu'il existait des planètes autour d'autres étoiles. La première de ces « exoplanètes » a été découverte en 1995 et aujourd'hui, on en connaît plus de 500.

Les planètes tournant autour d'autres étoiles ne peuvent, sauf exceptions, être observées directement. Dans la plupart des cas, le rayonnement de l'étoile est trop fort pour permettre de distinguer une petite planète à côté. On utilise donc surtout des méthodes indirectes pour les détecter. Il s'agit d'étudier l'influence sur l'étoile de l'existence d'une ou de plusieurs planètes tournant autour d'elle. On utilise deux méthodes principales. La première consiste à détecter le petit mouvement de l'étoile dû à la planète. En effet, si une planète tourne autour d'une étoile, il ne faut pas imaginer l'étoile fixe. En réalité, ce sont la planète et l'étoile qui tournent toutes les deux autour de leur centre de masse. Même si le mouvement de l'étoile est faible, on peut l'observer et en déduire la masse de la planète, sa distance à l'étoile et son orbite.

La deuxième méthode est le transit : si une planète passe devant son étoile, elle en cache une partie. Ainsi, lorsqu'on observe la lumière de l'étoile, on la voit qui diminue pendant tout le temps de passage de la planète, puis augmenter. Pour des raisons pratiques, cette deuxième méthode est plutôt utilisée depuis l'espace, avec des instruments à bord de satellites, alors que la première est utilisée depuis des observatoires au sol.

Ainsi, le système solaire n'est pas unique : il existe de nombreux systèmes multiplanétaires dans l'espace. On estime actuellement qu'environ 10% des étoiles devraient posséder des planètes. Parmi toutes ces planètes, existe-t-il

des planètes comme la nôtre ? Y a-t-il de la vie ailleurs ? Encore récemment, cette question relevait plutôt de la science fiction. À présent, c'est devenu une vraie démarche scientifique. Comment détecter la présence éventuelle de vie ? Depuis que l'on peut voir la Terre de l'espace, il est possible de reconnaître dans son rayonnement les signatures de la vie. Le rayonnement de la Terre n'est rien d'autre que le rayonnement solaire, réfléchi par ses surfaces solides après avoir traversé l'atmosphère. Ainsi, on y découvre des absorptions caractéristiques dues au gaz carbonique, à la vapeur d'eau et à l'ozone. En revanche, dans le rayonnement de Mars et Venus, on observe le gaz carbonique, mais il n'y a ni eau ni ozone. On peut donc espérer détecter éventuellement des signatures de la vie sur d'autres planètes.

Et l'Homme dans tout ça ?

Revenons à la révolution copernicienne. Elle est, à présent, complètement dépassée. Non seulement la Terre tourne autour d'une petite étoile banale ; non seulement la Galaxie contient deux cents milliards d'étoiles comme la nôtre, non seulement des milliards de galaxies semblables existent dans l'Univers, mais en plus il y a des planètes autour d'un grand nombre de ces étoiles. Nous vivons un nouveau vertige qui exige une nouvelle élaboration de la pensée humaine.

Tout ceci a été rendu possible grâce à une symbiose entre la recherche fondamentale, c'est-à-dire, la recherche d'une meilleure compréhension du monde qui nous entoure et dont nous sommes issus et la recherche appliquée et technologique, qui consiste en applications pour construire des objets utiles à l'Homme. Sans recherche fondamentale, pas de recherche appliquée. Sans les scientifiques qui ont cherché à mieux comprendre ce qu'est la lumière, nous n'aurions pas de télévision, pas de communication instantanée par téléphone ou ordinateur, pas de fours à micro-ondes, etc. Il est nécessaire de permettre à des « savant(e)s » qui cherchent simplement à mieux comprendre le monde, sans idées préconçues, de travailler librement. Mais d'un autre côté, s'il n'y avait pas la recherche appliquée et tech-

nologique, les chercheurs qui étudient les fondements du monde seraient bloqués. Les deux vont en symbiose. Sans technologie on n'avancerait pas dans la recherche fondamentale.

L'humanité doit à présent digérer ces informations, sachant que nous ne vivons pas sur n'importe quelle planète, mais sur la seule de toutes les planètes connues qui possède les conditions du vivant. Il a fallu beaucoup de conditions particulières, peut-être de coïncidences, pour que la vie ait pu s'y développer. À présent, vue depuis l'espace, la finitude de la Terre nous apparaît brutalement. Notre planète est petite et ses ressources sont limitées. Il est fondamental de la préserver.

Nous conjugons à la fois la vision de la Terre depuis l'espace, l'évidence de sa finitude, la connaissance de l'existence d'autres planètes, peut-être bientôt d'autres vies ailleurs. La communication est devenue instantanée sur toute la planète. Il est à présent possible de téléphoner à une personne aux antipodes sans aucun décalage, comme si elle se trouvait à côté. On peut même la voir directement avec les webcams. L'humanité toute entière fonctionne en réseau tout autour de la Terre, par-delà les frontières.

L'image de l'Homme est ainsi totalement différente de celle qui prévalait du temps de Copernic, totalement différente de celle du siècle dernier, et même d'il y a trente ans. Cette accélération des connaissances demande que l'humanité conduise une nouvelle réflexion de sur elle-même. L'humanité n'est pas encore assez mûre, elle a besoin d'une prise de conscience globale pour devenir plus responsable. Réussira-t-elle enfin à devenir adulte ?

Bibliographie

La Terre, l'espace et au-delà, Sylvie Vauclair, Albin Michel, 2009



Science, philosophie, religion : quels rapports ?

Jean Bricmont

Doctor en ciències i assagista. Professor ajudant al Departament de Matemàtiques a la Universitat de Princeton de Nova Jersey (EUA) del 1978 al 1981. Actualment és catedràtic de física teòrica de la Universitat Catòlica de Lovaina (Bèlgica). Membre de la Reial Acadèmia de Ciències, Lletres i Belles Arts de Bèlgica. Premi quinquennal del Fons Nacional de Recerca Científica (FNRS), 2005.

Dijous 2 de setembre

Peut-on « sauver » la religion ?

Cette question peut sembler saugrenue tant les religions semblent se porter à merveille, à l'échelle du monde. Mais ce qui est curieux c'est que, dans une Europe relativement déchristianisée, la religion est redevenue, aux yeux de beaucoup de non croyants, intellectuellement respectable. Tant que la religion s'exprime sous une forme « modérée », ce qui exclut en général l'islam, elle est perçue comme compatible avec la démocratie, la science, la laïcité, le féminisme, etc. Mais cette position est-elle intellectuellement défendable ?

Science et religion

Un sondage publié en août 2010, fait auprès de 16 membres du Collège de France, montre que 75% des interviewés disent ne pas croire en Dieu, mais que 85% d'entre eux pensent que l'on peut « concilier » science et croyance¹. Malheureusement, on ne leur a pas demandé ce qu'ils entendaient par « concilier ». On pourrait donner un sens très faible à ce mot en le réduisant à l'observation que beaucoup de grands scientifiques se sont déclarés croyants. Mais, comme le fait remarquer Richard Dawkins², il y a de moins en moins de grands scientifiques croyants. Et, pour ceux de l'époque de Galilée ou Newton, qui vivaient dans des sociétés où l'athéisme était fortement réprimé, on doit se poser la question de leur sincérité ou, du

¹ *Le Point*, n° 1977, 5 août 2010, p. 44.

² Richard Dawkins, *Pour en finir avec Dieu*, (trad. M-F Desjeux-Lefort) Librairie Académique Perrin, Paris, 2009.

moins, de savoir dans quelle mesure ils ne faisaient pas de nécessité vertu. Darwin, qui vivait à une époque ultérieure, était sans doute athée, mais était bien trop respectueux des mœurs de son temps (et des opinions de sa femme) pour en faire état publiquement. Néanmoins, comme on le verra plus loin, la question cruciale est de savoir ce que les savants croyants veulent dire exactement quand ils disent « croire en Dieu ».

On pourrait cependant donner un sens plus fort au terme « concilier », à savoir que l'on peut *rationnellement* être à la fois scientifique et croyant. Et, bien que ce sondage soit incomplet et pas très représentatif, il est probable qu'il reflète l'opinion dominante de beaucoup de scientifiques et d'incroyants : nous, personnellement, ne croyons pas ou nous « n'avons pas la foi », mais il n'y a, par ailleurs, aucune opposition entre science et religion. Il existe de multiples façons d'exprimer cette idée :

- La science répond à la question du « comment ? » mais pas du « pourquoi ? »
- La science ne répond pas à la question du sens.
- La science s'occupe de questions de fait, la religion de questions de valeur. Ce sont des « registres » différents.
- La religion s'occupe de questions « ultimes ».

La plupart des religieux « modernes », surtout parmi les chrétiens, tiennent le même genre de discours : ils ne pensent nullement contester la théorie de l'évolution ou toute autre théorie scientifique et voient la religion comme totalement indépendante de la science et par conséquent, conciliable avec elle.

Ce consensus peut paraître étrange car, après tout, pendant des siècles, il y a bien eu un combat entre science et religion³ ; pourquoi ce combat se serait-il terminé ? Est-ce la science qui a changé ? Ou la religion ? Ou les deux ?

³ Voir Bertrand Russell, (trad. Philippe-Roger Mantoux), *Science et religion*, Gallimard, Paris, 1990, pour une description détaillée.

Pour tenter de répondre à ces questions, il faut d'abord examiner les différents sens que peut avoir la croyance religieuse.

Que veut dire « croire en Dieu » ?

Il existe en fait différentes sortes de croyances religieuses qu'on pourrait résumer en parlant de différents « Dieux » : le Dieu-superstition, le Dieu-métaphysique et le Dieu-garant-de-la-morale ; avant d'explicitier ces notions, soulignons que l'expression « Dieu » est utilisée ici pour parler de façon condensée « d'une forme de Dieu auquel certaines personnes croient » et qu'on utilise le mot Dieu au singulier, pour la facilité, mais que les croyances auxquelles cette expression renvoie sont très variées.

Lorsque l'on visite un temple en Inde, on y voit un grand nombre de gens, souvent très pauvres, qui font des offrandes ou se prosternent devant ce que les chrétiens et les musulmans appellent des idoles, c'est-à-dire des statues de pierre représentant différentes divinités. Si l'on questionne ces personnes sur leurs motivations, il est peu probable qu'elles répondent qu'elles « ont la foi » ou qu'elles « ont fait le choix » de vivre ainsi. Elles ne se posent sans doute pas de questions, mais elles « savent », ou plus exactement elles croient savoir, que ces cultes ont des effets bénéfiques dans leur vie et que les négliger risque d'avoir des conséquences négatives. Leur poser la question des raisons de leurs croyances semblerait aussi saugrenu à leurs yeux que nous paraîtrait à nous la question de savoir pourquoi nous « croyons » que la bataille de Waterloo a eu lieu en 1815 ou que Tokyo est la capitale du Japon. Ce sont des faits bien connus dirions-nous, et eux répondraient sans doute la même chose.

Cela illustre l'idée du Dieu-superstition qui est, avant tout, une sorte de personne humaine, ayant comme nous des désirs et des caprices, mais invisible et dotée de pouvoirs surnaturels. C'est quelqu'un qui répond à nos

prières, accomplit des miracles et nous punit si l'on manque de respect à son égard. Contrairement à ce que voudraient croire les théologiens et les intellectuels chrétiens ou musulmans, qui aspirent à une religion « pure », non superstitieuse, ce Dieu-superstition est probablement le véritable Dieu de l'immense majorité des croyants, le Dieu qui intéresse réellement la plupart des êtres humains, parce que ceux-ci se préoccupent avant tout de leur bien-être, de leur santé, de la réussite de leurs enfants et que ce Dieu-superstition est supposé les aider sur ce plan-là, dans la vie ici-bas, non dans l'au-delà. C'est le Dieu-superstition que l'on invoque pour guérir d'une maladie, pour éviter des intempéries ou des catastrophes naturelles, ou encore pour « avoir la force » de surmonter diverses épreuves. C'est aussi le Dieu du « Gott mit uns », le Dieu qui « bénit l'Amérique » ou, plus prosaïquement, celui auquel pensent les joueurs de football qui font le signe de croix en montant sur le terrain.

Le Dieu-superstition est analogue à la croyance aux esprits, à l'animisme ou au polythéisme-mais, malgré les dénégations de leurs représentants officiels, il est extrêmement présent dans les religions nominalelement monothéistes ; pensons simplement aux images de saints, aux pèlerinages, aux bougies dans les églises, etc. et au caractère massif et extraordinairement populaire de ce genre de phénomènes.

Pour illustrer le fait que les croyances religieuses modernes ne sont pas tellement plus rationnelles que l'animisme, l'anthropologue Pascal Boyer rapporte l'histoire d'un dîner à Cambridge, au cours duquel il expliquait que chez les Fang, un peuple gabonais, on croit que les sorciers ont un organe interne qui s'envole la nuit pour détruire les récoltes des gens et qu'ils organisent des festins pendant lesquels ils dévorent leurs victimes. Un théologien catholique présent lui dit que ce qui rendait l'anthropologie passionnante c'était d'essayer de comprendre comment les gens pouvaient croire de telles inepties. Pascal Boyer fut trop poli pour lui répondre, mais il se dit que les Fang n'en reviendraient pas si on leur expliquait que « trois personnes étaient en *réalité* une seule personne tout en étant trois

personnes, ou que tous nos malheurs dans cette vallée de larmes sont dus à deux ancêtres qui ont voulu goûter à un fruit exotique dans un jardin. »⁴

Le théologien lui aurait sans doute répondu que les croyances catholiques, dans leur aspect superstitieux, ne doivent pas être prises au pied de la lettre. Mais si l'on « retirait » les superstitions des religions monothéistes, comme le souhaitent certains théologiens et intellectuels, ces religions ne conserveraient que peu d'adeptes. En fait ces théologiens et intellectuels sont tout aussi athées que les athées déclarés par rapport au Dieu-superstition, c'est-à-dire par rapport à celui qui compte réellement pour l'immense majorité des croyants.

La sécularisation de nos sociétés n'a pas fait réellement disparaître le Dieu-superstition, elle l'a en partie déplacé vers les superstitions usuelles : l'astrologie ou les médecines parallèles. On peut même voir la psychanalyse, qui est sans doute, à l'heure actuelle, en France, la plus intellectuelle des superstitions, comme une forme d'animisme : l'inconscient freudien fonctionnant comme une sorte d'esprit ayant, tout comme notre esprit, des désirs et des aspirations. Bien sûr, cet inconscient ne répond pas à nos prières, mais il existe une sorte de prêtres, les psychanalystes, qui sont supposés y avoir accès et sont, parfois, capables de le manipuler.

Le Dieu-superstition entre manifestement en conflit avec la science moderne, comme toutes les superstitions. Des assertions faites à propos de miracles ou de l'efficacité de la prière sont parfaitement testables, au moins autant que les assertions de l'astrologie ou des médecines parallèles. Les tests réalisés jusqu'à présent sont négatifs⁵.

4 Pascal Boyer, *Et l'homme créa ses Dieux*, Robert Laffont, Paris 2001, p. 293.

5 Voir Dawkins, *Pour en finir avec Dieu*, (trad. M-F Desjeux-Lefort), Librairie Académique Perrin, Paris, 2009.

Les premières études statistiques sur l'(in)efficacité de la prière remontent au moins à Francis Galton, « Statistical Enquiries into the Efficacy of Prayers », *The Fortnightly Review*, n° 12, août 1872, p. 125-135.

Un autre problème du Dieu-superstition, c'est sa multiplicité. Toutes les cultures ont ce genre de croyances et il est difficile d'imaginer qu'elles soient toutes vraies ; cela justifierait un degré de polythéisme difficile à accepter. Mais, dans toutes les cultures, on trouvera des témoignages sur l'efficacité des prières et la présence de miracles ; si les chrétiens et les musulmans n'accordent que peu de foi aux miracles, mettons, dans la religion hindoue, pourquoi accorder foi à leurs prodiges ?

Une façon d'essayer de sortir du problème de la multiplicité des croyances, c'est d'introduire le Dieu-métaphysique ; celui-ci est le créateur de l'univers, le fondement de l'Être, le premier moteur, le principe fondamental du Tout. C'est peut-être l'Inconnu suprême, le Dieu négatif, le « quelque chose qui nous dépasse », le mystère absolu. C'est le Dieu dont St Thomas, St Anselme, Descartes ou Gödel ont tenté de prouver l'existence. C'est le Grand Architecte de l'univers. C'est le Dieu des déistes et celui sur l'existence duquel les agnostiques refusent de se prononcer. Pour certains, le Dieu-métaphysique peut même se réduire à la Nature ou à ses Lois, auquel cas l'épithète métaphysique devient discutable.

Quand Bertrand Russell fut mis en prison pendant la première guerre mondiale pour son opposition à la guerre, le gardien lui demanda quelle était sa religion. Il répondit « agnostique » et le gardien, perplexe lui dit : « je pense que cela va, nous croyons tous dans le même Dieu ». C'était de nouveau du Dieu-métaphysique qu'il s'agissait, Russell n'étant sûrement pas agnostique par rapport au Dieu-superstition. Le Dieu-métaphysique est le seul qui peut être le « même » pour tout le monde, parce qu'il ne possède aucune propriété précise, contrairement au Dieu-superstition, dont les propriétés varient d'une culture à l'autre.

C'est malheureusement sur le Dieu-métaphysique que se concentrent les discussions sur l'athéisme, l'agnosticisme ou les relations entre science et foi. La bonne réponse n'est pas de nier l'existence du Dieu-métaphysique (comme on doit le faire avec le Dieu-superstition) mais de rejeter la question comme étant dénuée de sens et d'intérêt. En effet, que savons-nous de Lui, rien, strictement rien – et c'est bien pour cela qu'il est raisonnable

de le mettre de côté. Ce qui intéresse réellement les êtres humains c'est un Dieu qui s'ingère dans nos affaires, en nous aidant ou en punissant les « méchants ».

Mais comment peut-on imaginer que le Dieu-métaphysique se préoccupe le moins du monde de savoir si Ahmed ou Jacob mangent du porc, si Fatima a un voile qui cache ses cheveux, ou si Jacques va à la messe tous les dimanches ? Ce Dieu-là se préoccupe-t-il de savoir qui gagne une guerre ou un match de football ? Se soucie-t-il même de cette petite créature s'agitant sur une planète perdue dans l'univers et qu'on appelle l'Homme ?

Quand on dit que certains scientifiques célèbres sont croyants, on parle presque toujours de la croyance en un Dieu-métaphysique, pas en un Dieu-superstition. Et quand les membres du Collège de France disent que science et croyance sont compatibles, ils pensent sans doute à la croyance dans le Dieu-métaphysique, pas dans le Dieu-superstition, qui est évidemment incompatible avec la science.

Le Dieu-métaphysique est néanmoins incompatible avec l'esprit de la science, précisément parce qu'il est métaphysique, c'est-à-dire inconnaissable et qu'aucune hypothèse faite à son sujet ne peut être testée.

Le Dieu-métaphysique est aussi le Dieu du « principe anthropique », qui affirme que diverses constantes physiques ont dû être soigneusement « choisies » pour que la vie ait pu exister dans l'univers et celui du « dessein intelligent » qui considère que la sélection naturelle ne peut, à elle seule, expliquer l'évolution de la vie. C'est le Dieu dont on parle quand on dit que la science mène à Dieu, ou que l'on veut aller « au-delà » de la science, tout en prétendant rester dans sa logique, en invoquant la théorie du chaos, la mécanique quantique ou le théorème de Gödel. Mais ces Dieux ne font que remplir artificiellement les trous (bien réels) dans nos connaissances. Comme personne ne peut inférer la moindre propriété concrète du dessein intelligent ou de ce qui serait derrière le principe anthropique, à part le fait qu'ils ont exactement les propriétés nécessaires pour que le monde soit ce qu'il est, les invoquer revient à dire « on ne sait pas ».

La différence entre les athées et les agnostiques porte presque toujours sur le Dieu métaphysique –les agnostiques pensent souvent que l'athéisme consiste à affirmer avec certitude l'inexistence du Dieu métaphysique, ce qui est effectivement, presque par définition, impossible. Si, par contre, on définit l'athéisme comme le rejet du Dieu-superstition et comme l'indifférence à l'égard de l'inconnaissable Dieu-métaphysique, alors la différence avec l'agnosticisme devient difficile à définir.

La seule façon de faire un lien entre le Dieu-superstition et le Dieu-métaphysique est à travers la révélation ou l'envoi d'un « messager ». Dans la révélation, le Dieu tout puissant, créateur de l'univers, de toutes les choses visibles et invisibles, etc. explique aux hommes ce qu'il attend d'eux, comment le respecter et comment obtenir certains avantages. Tout cela est en général expliqué dans un Livre.

Mais la révélation rencontre un problème similaire à celui de la superstition : laquelle choisir ? Même en se restreignant aux religions du Livre, on a l'embarras du choix, non seulement entre judaïsme, christianisme et islam, mais entre toutes les variantes à l'intérieur de ces différentes religions. Même à l'intérieur d'une variante donnée, mettons le catholicisme, où il existe une hiérarchie qui garantit en principe l'homogénéité idéologique, on trouve un grand nombre d'interprétations divergentes.

Évidemment, chaque religion ou chaque secte a sa propre apologétique, tendant à démontrer que son interprétation de son livre sacré est la « bonne ». Ce qu'il importe de souligner, c'est que chaque interprétation se justifie au moyen de critères qui sont, en fin de compte, purement humains. Les chrétiens diront que leur religion est plus compatible avec la démocratie, la laïcité ou le féminisme que l'islam. Les chrétiens de gauche ou les théologiens de la libération diront que leur version du christianisme est plus proche des pauvres. Les musulmans rétorqueront que leur religion est plus purement monothéiste, etc.

Mais comment savoir ce que le Dieu-métaphysique est ou veut vraiment ? Comment savoir s'il ne souhaite pas un ordre social injuste (à nos yeux), la soumission des femmes ou la dictature ? Comment même savoir s'il est unique et pas multiple ? Comment même imaginer un argument qui permette de départager les différentes religions ou interprétations *de ce point de vue-là* et non d'un point de vue purement humain ? On ne peut pas aller demander au Dieu métaphysique ce qu'il a *vraiment* voulu dire, parce que tout ce dont on dispose, ce sont un certain nombre de textes, contradictoires entre eux, ouverts à une multitude d'interprétations, également contradictoires entre elles et nous n'avons accès à strictement rien d'autre.

L'autre problème lié aux révélations, c'est que les livres sacrés contiennent presque tous des textes indéfendables aujourd'hui, soit pour des raisons morales, soit à cause de développements scientifiques. La réponse des croyants est, en général, qu'il faut situer ces écrits dans le contexte de leur époque et tenir compte du fait qu'ils ont été produits par des êtres humains faillibles et imparfaits. Mais, à nouveau, comment séparer ce qui est humain de ce qui est vraiment révélé ? Qui sommes-nous pour dire à Dieu ce qu'il a vraiment voulu dire ? L'attitude littéraliste, même si elle force ses adhérents à avaler un bon nombre de couleuvres, a au moins l'avantage de la cohérence.

Finalement, il y a le Dieu-garant-de-la-morale. Le Dieu-superstition est en partie garant de la morale, dans la mesure où il nous récompense et nous punit *dans ce monde-ci* pour nos actions. Mais comme manifestement les infortunes de la vertu et les prospérités du vice abondent dans le monde ici-bas, il faut nécessairement introduire l'idée d'une vie après la mort pour que justice soit faite. Et c'est cette idée qui pose le plus de problèmes. Elle est d'une certaine façon métaphysique, parce que non testable, tout en étant superstitieuse et en réalité incompréhensible : ce qui est supposé survivre à la mort physique, c'est d'une certaine façon notre esprit. Mais sous quelle forme ? Si quelqu'un meurt en état d'inconscience, est-ce que son esprit survit inconscient pour l'éternité ? Si non, sous quelle forme survit-il ? Re-vient-on à un âge antérieur à celui de notre mort et si oui, lequel ?

De nouveau, les théologiens apportent sans doute des réponses multiples à ces questions, mais sans jamais avoir le moyen de déterminer, même en principe, quelle est la bonne, parce qu'il n'y a aucun moyen d'interroger le Dieu-métaphysique sur le sort qu'il nous réserve dans l'au-delà.

En fin de compte, toutes les variantes de la « croyance en Dieu » sont bel et bien incompatibles avec la science, ou du moins avec son esprit.

Considérations pratiques

C'est le Dieu-garant-de-la-morale qui, d'un point de vue pratique, est le plus important de tous, parce que c'est lui qui fait en sorte que la religion ait un impact politique. Le Dieu-superstition fait beaucoup de tort, parce qu'il mène à préférer les mauvaises thérapies aux bonnes et en général, mène à des choix pratiques inefficaces, mais pas plus que les superstitions, puisqu'il est de même nature que celles-ci. Le Dieu-métaphysique, à lui seul, ne fait aucun tort si ce n'est d'obscurcir la pensée humaine, comme le fait en général la métaphysique, mais c'est sans doute un mal dont les effets sont limités.

Quels sont les effets du Dieu-garant-de-la-morale ? Diderot distinguait dans les « livres inspirés » (c'est-à-dire révélés) deux morales : « l'une, générale et commune à toutes les Nations, à tous les cultes et qu'on suit à peu près ; une autre, propre à chaque nation et à chaque culte, à laquelle on croit, qu'on prêche dans les temples, qu'on préconise dans les maisons, et qu'on ne suit point du tout »⁶. Quand Diderot dit qu'on ne suit « point du tout » la morale spécifique à chaque culte, il pense sans doute au christianisme décadent de son époque, mais il est évident qu'à d'autres époques et en d'autres lieux, les règles vestimentaires, culinaires ou sexuelles particulières à chaque religion, sont très suivies. Et, pour ce qui est de la « morale

⁶ Denis Diderot, *Pour une morale de l'athéisme. Entretien d'un philosophe avec la maréchale de ****, Mille et une nuits, Paris, 2007, p. 24.

commune », ce concept est sans doute plus difficile à préciser que Diderot ne le pensait ; cependant, quand les gens abandonnent leurs croyances religieuses, ils abandonnent aussi certaines pratiques, celles liées spécifiquement à leur religion, mais ils ne se mettent pas, en règle générale, à tuer ou à voler leurs voisins, c'est-à-dire qu'ils continuent à respecter une morale commune et humaine.

Notons qu'un des principaux arguments des religieux est que seule la religion permet de garder les gens « dans le droit chemin » et de leur faire respecter justement cette morale commune. Cette idée est extrêmement répandue, y compris parmi beaucoup d'incroyants. Néanmoins, certaines études empiriques montrent une corrélation assez forte dans les pays développés entre croyance en Dieu et certains maux sociaux tels que les homicides, la mortalité juvénile, les maladies vénériennes, les adolescentes enceintes et même l'avortement⁷. Bien sûr, on ne peut pas tirer de cette corrélation un lien de cause à effet (il est probable que ces maux sociaux et la croyance religieuse aient des causes communes, par exemple l'inégalité sociale⁸), mais cela montre que l'existence d'un lien causal inverse, entre absence de croyance religieuse et immoralité, que beaucoup de religieux soutiennent, est loin d'être démontré. De toutes façons, même si cet argument utilitariste en faveur de la religion (comme moyen de faire respecter la morale) était vrai, il ne nous dirait rien sur la question de savoir si celle-ci est vraie ou fausse.

Il y a un troisième impact moral de la religion, ce qu'on pourrait appeler l'encouragement au fanatisme, c'est-à-dire à des actions qui vont à l'encontre de la morale commune, tuer des innocents par exemple, ou imposer les morales particulières à une religion donnée à l'ensemble de la société.

7 Gregory S. Paul, « Cross-National Correlations of Quantifiable Societal Health with Popular Religiosity and Secularism in the Prosperous Democracies : A First Look », *Journal of Religion & Society* 7 (2005), <http://moses.creighton.edu/JRS/2005/2005-11.html#figures>.

8 Sur le lien entre inégalité et maux sociaux, voir Richard Wilkinson, Kate Pickett, *The Spirit Level. Why Equality is Better for Everyone*, Penguin Books, Londres, 2010.

Le fanatisme est presque toujours lié à la croyance dans l'au-delà. En effet, si la vie ici-bas n'est qu'une préparation à la vie éternelle dans l'au-delà, pourquoi se soucier d'autres commandements que les commandements divins ou supposés tels ?

Évidemment, beaucoup de chrétiens modernes, libéraux ou « progressistes », ont laissé tomber les aspects fanatiques de leur religion, ainsi que l'interprétation littérale des textes sacrés. Ils mettent de côté l'idée du ciel et de l'enfer (en tout cas, de l'enfer) et se replient de plus en plus sur le Dieu métaphysique. À la limite, la question de savoir si ce qu'ils disent est vrai ou faux ne les intéresse pas. Ce qui compte, ce sont les « choix personnels » que l'on fait ou « se sentir bien ». Mais la question qu'on est en droit de leur poser est « que peut bien encore signifier votre religion ? » Lorsqu'ils parlent, comme ils le font souvent, de « donner du sens » ou de « l'espérance », qu'est-ce que cela veut dire si on ne croit pas à la vie éternelle ? Et si on y croit, pourquoi ne pas la prendre au sérieux et passer la vie ici-bas à s'y préparer en suivant à la lettre les prescriptions divines ?

Le christianisme moderne est devenu tellement vide de contenu qu'il peut paraître inoffensif, et il l'est effectivement, si l'on met de côté la confusion intellectuelle qu'il engendre. Il a néanmoins des effets pervers : il amène bon nombre d'incroyants et de laïcs en Europe, à le prendre pour le paradigme de ce qu'est une religion. Ceci entraîne l'abandon progressif de la critique rationaliste de la religion, vue comme dépassée, étant donné le côté « inoffensif » du christianisme moderne. Une des raisons pour lesquelles beaucoup de laïcs et de scientifiques acceptent l'idée de la compatibilité entre science et foi, c'est que, présentée sous la forme du christianisme moderne, la foi ne veut plus rien dire (ou presque). Mais d'un point de vue géographique et historique, le christianisme moderne est une aberration dans l'ensemble de croyances religieuses qui sont, pour la plupart, littéralistes.

De plus, cela amène beaucoup d'incroyants à exiger des autres religions, l'islam ici ou le christianisme fondamentaliste aux États-Unis, qu'elles

« s'adaptent » ou se « modernisent », pour ressembler au christianisme moderne. Mais c'est oublier que celui-ci est le résultat de siècles de combat rationaliste contre la religion, la croyance, et l'irrationnel en général. Les chrétiens modernes ne le sont pas devenus parce qu'on leur a dit d'être laïcs ou d'être gentils avec les femmes, les homosexuels ou les incroyants, mais parce que la solidité de leurs croyances a été petit à petit sapée par la critique scientifique et rationaliste. Le christianisme moderne est en grande partie une réaction d'adaptation face à la défaite intellectuelle du christianisme traditionnel.

La critique des religions qui sont considérées comme nocives (en Europe, essentiellement, l'islam) est aujourd'hui presque exclusivement une critique *morale*, se concentrant sur les aspects « barbares » de certaines pratiques particulières, sur le fondamentalisme au niveau dogmatique, ou sur le fanatisme. Mais c'est sous-estimer le fait que la critique purement morale de la religion est sans effet, parce que ce qui semble fanatique aux incroyants est parfaitement *rationnel* pour les croyants, du moins pour ceux qui prennent au sérieux l'idée de la vie éternelle et du ciel et de l'enfer. Si on accepte ces prémisses (sur le ciel et l'enfer) il serait totalement absurde de risquer d'aller en enfer pour se conformer à de simples prescriptions humaines. Pour changer les comportements, il faudrait d'abord ébranler les croyances et, pour cela, revenir à une critique rationaliste et non purement morale de la religion.

Un autre problème rencontré par la critique morale de la religion est que les religieux ripostent en soulignant le côté immoral de nombreux courants athées ou supposés tels ; au choix : nazisme, communisme, colonialisme, ou consumérisme destructeur de l'environnement. D'un côté on hurle en parlant de l'Inquisition ou des Croisades et de l'autre, on répond avec Hitler et Staline. Si les incroyants disent que les idées de ces derniers constituent en réalité une forme de croyance quasi-religieuse, les croyants répondront que la violence faite au nom de la religion est une déformation du « véritable » message religieux. On ne s'en sort pas, tant qu'on ne pose pas la question de la *vérité* : le discours religieux est-il vrai ou faux ? Imaginons un instant

que Dieu existe vraiment et qu'il aime, mettons les Croisades, l'Inquisition ou le régime féodal, comme on l'imaginait au Moyen-Âge. Il enverrait par conséquent en enfer tous ceux, y compris les chrétiens modernes, qui s'opposent à ces pratiques. Quelle objection pourrait-on bien soulever dans ce cas à ces pratiques que nous condamnons comme moyenâgeuses ? Bien sûr, presque plus personne ne croit dans ce genre de Dieu, mais justement, cela veut dire qu'on ne croit plus que ce type de discours religieux soit *vrai*. Et cela montre que même le discours chrétien moderne qui tente de mettre de côté la question de la vérité ou de la fausseté de la religion, présuppose que certaines choses auxquelles les croyants ont adhéré pendant des siècles sont, en réalité, fausses.

Le christianisme moderne fonctionne comme une sorte de ruse de la déraison qui amène les incroyants à ne plus comprendre la logique de la religion, à abandonner la critique rationaliste de celle-ci et à la combattre lorsqu'ils considèrent ce combat nécessaire, à travers un discours purement moralisateur dont on peut sérieusement craindre qu'il ne soit totalement inefficace.



Mujer y ciencia: mi propia experiencia

Margarita Salas

Doctora en ciències, catedràtica d'investigació del CSIC (1974-2008) al Centre de Biologia Molecular «Severo Ochoa» (CSIC-UNAM). Doctora *ad honorem* del CSIC. Directora de l'Institut d'Espanya (1995-2003). Membre de l'Organització Europea de Biologia Molecular (EMBO), de la Reial Acadèmia Espanyola, de la Reial Acadèmia de Ciències Exactes, Físiques i Naturals i de l'Acadèmia Nacional de Ciències dels EUA.

Divendres 3 de setembre

Quisiera para empezar hacer una retrospectiva histórica y señalar el papel que jugaron las mujeres en la ciencia desde los albores de la civilización. De hecho, la referencia a mujeres que tomaron parte en el desarrollo de ciertas especialidades científicas o médicas datan de hace unos 4.000 años. Citando a Margaret Alic quien escribió *Historia de las mujeres en la ciencia desde la antigüedad hasta fines del siglo XIX*: «Nuestras primeras antepasadas aprendieron a preparar barro y hornear cerámica, y descubrieron la química de los esmaltes. Con el tiempo, los hornos de alfarería de las primeras ceramistas llegaron a convertirse en las forjas de la Edad de Hierro. Para la época de Cro-Magnon, las mujeres ya fabricaban joyería y mezclaban cosméticos, origen de la ciencia química».

Con el establecimiento de la civilización griega (600 a.C.) la mujer se hizo presente en la escuela matemática de Pitágoras, aun cuando, en general, la mujer griega estuvo muy confinada al mundo del hogar. En la Grecia clásica las mujeres vivían en un estado de segregación, legitimada además por la opinión difundida, y suscrita por voces autorizadas como la de Aristóteles, de la inferioridad básica del sexo femenino. A pesar de ello, algunos nombres han llegado hasta nosotros, como los de Agnodice, famosa en el campo de la medicina y la obstetricia, pero también por haber sido protagonista de una de las primeras rebeliones femeninas.

Con el advenimiento del Imperio Romano, Grecia dejó de ser el Centro de la cultura de la Edad Antigua para pasar a Egipto, en Alejandría, donde aparecen dos mujeres científicas importantes. Una de ellas fue la alquimista María (María la Hebrea), que vivió en el siglo I a.C., y es la primera mujer cuyos escritos se conservan. Fue famosa por su habilidad para diseñar aparatos químicos, como por ejemplo el baño María que debe a ella su nombre.

Como química se distinguió en el campo de los pigmentos, siendo su contribución más importante la del *Mary's Black*, una preparación de sulfuro de cobre y plomo que se usa en pintura.

Pero la más conocida de las mujeres científicas de la antigüedad es Hypatia de Alejandría (370-415 a.C.), primera mujer científica cuya obra se conoce con detalle. Su formación inicial la recibió de su padre, un conocido astrónomo y matemático. Después de estudiar en Atenas y en Italia, Hypatia volvió a Alejandría, donde ocupó un puesto en la academia Neoplatónica. Hypatia fue una científica polifacética, cultivando la física, química, mecánica y medicina, aunque destacó fundamentalmente en matemáticas y astronomía. Hasta nosotros ha llegado el testimonio de sus obras principales: entre otras, trece volúmenes de comentarios a la Aritmética de Diofano, y el Corpus Astronómico, tablas sobre los movimientos de los cuerpos celestes. Además, como se desprende de sus dibujos de instrumentos científicos, Hypatia también era experta en mecánica y tecnología.

Contrariamente a lo que pueda pensarse, en la segunda mitad del primer milenio y en los primeros siglos del segundo las mujeres fueron libres para dedicarse a sus intereses científicos. Por otra parte, a través de la difusión del estilo de vida monástica, la Edad Media hizo posible que las mujeres estudiaran y gozaran de libertad intelectual. En esta época destaca Hildegard de Bingen (1098-1179), abadesa de un convento benedictino. Entre sus obras en el campo científico destacan el *Liber Scivias*, que incluye su primera cosmología completa, la enciclopedia de historia natural titulada *Physica*, así como su última cosmología. Hay que destacar que las obras de Hildegard influyen sobre el pensamiento científico hasta el Renacimiento.

Con el establecimiento de las universidades entre los siglos XII al XV, disminuyeron las oportunidades de formación de las mujeres, que habían estado centradas en los conventos. En este sentido, las universidades más abiertas fueron las italianas. Sin embargo, es durante la revolución científica del siglo XVII cuando se sientan las bases para el ingreso de las mujeres en el mundo científico, no solamente en Italia, sino también en países como In-

glaterra y el Norte de Europa donde la oposición a la instrucción femenina fuera de los conventos era muy fuerte. Es de destacar que en esta época las mujeres están presentes en todos los campos científicos: química, botánica, biología, geología, astronomía, matemáticas, además de medicina que es donde más habían destacado en el pasado.

De acuerdo con los historiadores, el establecimiento de las Academias constituye el origen de la ciencia moderna. Las principales Academias europeas se fundan en el siglo xvii: en 1662 la Royal Society de Londres, en 1666 la Académie Royale des Sciences de París, en 1700 la Societas Regia Scientiarum de Berlín. A finales del siglo xviii existía en Europa un número considerable de Academias, que eran instituciones vinculadas a las universidades. A medida que el prestigio de las Academias aumenta, las mujeres son excluidas de ellas. Así, la Real Academia de Ciencias de Francia impidió que las mujeres entrasen como miembros de número. Aunque la Royal Society de Londres tenía unos estatutos más abiertos, no admitió a ninguna mujer hasta 1945.

En España, se creó la Academia de Matemáticas de Madrid en 1582 durante el reinado de Felipe II. En 1713 se fundó la Real Academia Española que, en los planes de su promotor, el marqués de Villena, debería abarcar todas las ciencias, aunque este propósito no se realizó. Se fundó, en cambio, en 1734, la Real Academia de Medicina y Ciencias Naturales. Después de un siglo, en 1834 se creó la Real Academia de Ciencias Naturales de Madrid, separándose de la de Medicina, y finalmente en 1847 se creó la actual Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, quedando suprimida la anterior.

Si la primera mujer científica entró en la Royal Society en 1945, la primera que entró en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, no lo fue hasta 1988. Este año, tomó posesión como Académica numeraria la segunda mujer en esta Real Academia que tiene un total de 52 académicos. Otras Academias, como la de Medicina, tiene tan solo una académica numeraria de un total de 44 académicos, la Academia de Ingeniería tiene

dos académicas numerarias, siendo la Academia de Farmacia la que más académicas numerarias tiene: 5 de un total de 48 académicos. Es decir, si sumamos el número de académicas en la distintas Academias relacionadas con las ciencias hay tan solo 10 académicas numerarias de un total de cerca de 200 académicos.

Se conocen algunos casos de mujeres que pudieron publicar sus trabajos en algunas Academias o que fueron reconocidas de algún modo por ellas. Así, Gabrielle-Émilie du Châtelet (1706-1749), una de las primeras personas que popularizó la física de Newton, pudo publicar en 1738 su trabajo sobre la propagación del fuego en las Actas de la Real Academia de las Ciencias de París. En un escrito que dirigió a Federico de Prusia le decía: «Juzgadme por mis propios méritos o por la falta de ellos, pero no me consideréis como un mero apéndice de este gran general o de aquel renombrado estudioso, de tal estrella que relumbra en la corte de Francia o de tal autor famoso. Soy yo misma una persona completa, responsable solo ante mí por todo cuanto soy, todo cuanto digo, todo cuanto hago» y termina: «así que, cuando sumo el total de mis gracias, confieso que no soy inferior a nadie». Por otra parte la Royal Society de Londres publicó, a partir de 1787, los seis trabajos de Caroline Herschel sobre el descubrimiento de cometas. En 1828, a los 75 años, ella completó su gran obra sobre la posición de casi 2.500 nebulosas, trabajo que le hizo ganar la medalla de oro de la Royal Astronomy Society.

Pasando ya al siglo xx, este es el siglo en el que las mujeres confirman su papel en el mundo de la investigación. La primera de estas mujeres notables es María Skłodowska, conocida universalmente como Marie Curie. Nacida en Polonia en 1867, se marchó a París en 1891 donde se licenció en Ciencias Físicas y en Matemáticas, casándose con el físico Pierre Curie. Después de tener a su primera hija, Irene, Marie Curie decidió realizar su tesis doctoral, algo insólito para una mujer en aquella época, estudiando las radiaciones que desprendían las sales de uranio. Posteriormente, en colaboración con su marido, descubrió un nuevo elemento, mucho más activo que el uranio, al que los Curie denominaron polonio. Este descubrimiento lo comunicaron a la Academia de Ciencias de Francia utilizando por primera vez la palabra

«radiactivo» para describir el comportamiento de estas sustancias. Poco después descubrieron un nuevo elemento al que llamaron radio.

En 1990 Pierre Curie fue nombrado catedrático de Física de la Sorbona, mientras que Marie ocupó una plaza de profesora de Física en la Escuela Normal de Sèvres. En 1903 les llegó el reconocimiento científico, cuando les fue concedido el Premio Nobel por su descubrimiento del polonio y del radio. Desgraciadamente, no pudieron acudir a Estocolmo a recibir el premio pues su salud, especialmente la de Marie, estaba muy afectada debido a la continuada exposición a la radiactividad. El Nobel le valió a Pierre la creación en 1904 de una cátedra específica para él, con un laboratorio que llevaba Marie. En 1905, Pierre ingresó en la Academia de Ciencias de Francia, falleciendo un año después en un trágico accidente. Marie sucedió a su marido en la cátedra, convirtiéndose en la primera mujer de Francia que accedía a la enseñanza superior. Un año más tarde, en 1911, recibía el Premio Nobel de Química, siendo la primera vez que una persona obtenía el Premio Nobel dos veces. En 1931 le fue concedida la medalla de oro de Francia. En 1934 Marie Curie moría de leucemia a los 67 años. Un año después, su hija Irene, casada con el también físico Frederic Joliot, obtendría, junto con su marido, el Premio Nobel de Física por sus investigaciones sobre la producción artificial de elementos radiactivos.

Otro caso de científica ejemplar es el de Barbara McClintock (1902-1992). Barbara McClintock inició sus estudios en la Universidad de Cornell en 1919, doctorándose en 1927 en el Departamento de Genética, donde no fue admitida de un modo oficial, ya que no estaba prevista la admisión de mujeres. En aquellos tiempos la genética era una ciencia hecha por los hombres –de hecho, en la Universidad de Cornell no se nombró profesora a una mujer hasta 1947, excepto en el Departamento de Economía Doméstica. Son los momentos iniciales de los estudios genéticos sobre el maíz, y Barbara McClintock encuentra un puesto de trabajo como ayudante de laboratorio de un profesor que llevaba dos años intentando teñir los cromosomas de esta planta. Barbara McClintock resuelve el problema en tres días, atrevimiento que motivó que fuera despedida del empleo. Finalmente, consigue

un lugar de trabajo en los laboratorios Cold Spring Harbor en el estado de Nueva York, es elegida en 1944 miembro de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, en 1945 ocupa el puesto de presidenta de la Genetic Society of America y en 1983, por el descubrimiento de la transposición genética, los popularmente llamados «genes saltarines», consigue a sus 81 años un tardío pero merecido Premio Nobel de Medicina.

Otras doce científicas consiguen el Premio Nobel de Física, de Química o de Medicina: se trata de Gerty Cori, nacida en Praga y trasladada a Estados Unidos obtuvo en 1947 junto a su marido Carl Cori el Premio Nobel de Medicina por sus investigaciones sobre la síntesis biológica del glucógeno y el mecanismo de acción de la insulina; sin embargo, como en el caso de Pierre y Marie Curie, fue Carl Cori el que obtuvo la cátedra y no Gerty, quien obtuvo solo un puesto de asociada con un sueldo que era el 10% del de su marido; María Goeppert Mayer, quien obtuvo en 1963 el Premio Nobel de Física por sus estudios sobre las propiedades de los núcleos atómicos; Dorotyy Crowfoot Hodkin, recibió el Premio Nobel de Química en 1964 por su determinación de estructuras de gran trascendencia biológica, tales como la insulina, el colesterol, la penicilina y la vitamina B12 después de haber sido nombrada miembro de la Royal Society, de la Real Academia Holandesa de las Ciencias y de la Academia Americana de Artes y Ciencias; Rosalyn Sussman Yalow, obtuvo el Premio Nobel de Medicina por sus investigaciones que llevaron al perfeccionamiento de la determinación radioinmunológica de alta intensidad; Rita Levi Montalcini, italiana, se tuvo que trasladar a Estados Unidos después de la Segunda Guerra Mundial debido a la persecución que sufrió por su condición de judía, descubriendo el factor de crecimiento neurológico, lo que le valió el Premio Nobel de Medicina en 1986, a los 77 años; Gertrude Belle Elion, obtuvo el Premio Nobel de Medicina en 1988 por sus estudios sobre fármacos contra diversas enfermedades como la leucemia; Christiane Nüsslein-Volhard, nacida en Alemania en 1942, obtuvo en 1995 el Premio Nobel de Medicina por sus estudios sobre genética del desarrollo utilizando como sistema la mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*; más recientemente, en 2004, Linda

Buck por sus estudios sobre las proteínas implicadas en el sistema del olfato; en 2008, Françoise Barré-Sinoussi por su descubrimiento del virus del SIDA; finalmente, en 2009, tres mujeres han recibido el Premio Nobel; dos, Elisabeth Blackburn y Carol Greider el de Medicina por su descubrimiento de los telómeros y la telomerasa, y Ada Yonath el de Química, por la determinación de la estructura tridimensional del ribosoma.

Estas 15 mujeres son las únicas que han llegado a la cúspide en el área de las ciencias, considerando la cúspide la obtención del Premio Nobel. Frente a estas 15 mujeres, más de 300 hombres consiguieron el Premio Nobel en dicha área. Otras científicas muy valiosas tuvieron menos suerte que las anteriores y no consiguieron un merecido Premio Nobel. Entre ellas destaca Rosalind Franklin. Su trabajo fue básico en el descubrimiento de la estructura de doble hélice del DNA por Watson y Crick. Sin embargo, en parte debido a su muerte prematura –a los 37 años, de cáncer– y en parte debido a su condición de mujer, lo cierto es que la historia no le ha hecho justicia. Sólo recientemente se ha empezado a reconocer su contribución con ocasión del 50 aniversario de la doble hélice.

Otra científica que también destaca por sus importantes contribuciones en el campo de la Física es Lise Meitner (1878-1968), austriaca de nacimiento y alemana de adopción, su sangre judía hace que tenga que emigrar a Suecia. Llamada por Einstein «la Marie Curie alemana» su nombre ha quedado vinculado al de la física nuclear. Según comenta Otto Hahn, de formación química, quien formó un excelente tándem con Lise Meitner: «El comienzo fue difícil para ella. Emil Fisher, el director del Instituto de Química en Berlín, no aceptaba a las mujeres, pero hizo una excepción en favor suyo, con la condición de que no entrara en laboratorios donde trabajaban estudiantes varones». Fue la segunda mujer que en Viena alcanzó el título de doctor en Física, en 1906, y también la segunda que obtuvo la *venia legendi* en Física por una Universidad alemana. Como anécdota, la conferencia pronunciada por Lise Meitner en 1922 al obtener la *venia legendi* por la Universidad de Berlín titulada «Problemas de Física Cósmica» apareció en la prensa con el título «Problemas de Cosmética Física». Aunque Lise

Meitner fue clave en el descubrimiento de la fisión nuclear, el Premio Nobel de Química fue obtenido en 1944 por su compañero de trabajo Otto Hahn quien reiteradamente ocultó la contribución de Lise Meitner, quedando ésta en el olvido.

Otras dos científicas de nuestro siglo a las quiero mencionar son Kathleen Lonsdale y Marguerite Perey. Kathleen Lonsdale desarrolló la mayor parte de su actividad científica en el University College de Londres, donde fue la primera mujer profesora, siendo a su vez la primera mujer elegida miembro de la Royal Society en 1945, y la primera mujer presidenta de la Asociación Británica para el Avance de las Ciencias. Entre sus trabajos más importantes se encuentra el descubrimiento de la estructura plana del benceno. Marguerite Perey perteneció a la escuela francesa de radioquímica iniciada por Marie Curie. En 1939 descubrió el francio, denominado en honor a su país de origen, último de los elementos químicos naturales. En 1949 fue nombrada titular de Química Nuclear en la Universidad de Estrasburgo. Fue la primera mujer miembro correspondiente de la Academia de las Ciencias de Francia, en 1962, desde su fundación por Luís XV en 1666. Es decir, tuvieron que pasar casi 300 años para que una mujer fuese nombrada miembro correspondiente, no numerario, de la Academia de Ciencias francesa.

Aunque estamos en el año 2010, son todavía pocas las mujeres que forman parte de Academias de Ciencias en el ámbito europeo, con una media del 4%. En España, como hemos visto antes, la proporción es similar. En un trabajo de hace unos años, M^a Jesús Santesmases, analiza una muestra de 48 científicas españolas, todas ellas doctoradas antes de 1970 en ciencias biológicas o biomédicas. Muy pocas de entre ellas han alcanzado el máximo reconocimiento profesional que han podido alcanzar sus colegas los hombres, y han estado dedicadas a actividades más propias del trabajo diario del laboratorio que de su dirección. Es decir, ha habido un reparto de roles dentro de los grupos de investigación entre hombres y mujeres que está en línea con el reparto de roles por sexo en el resto de las actividades y responsabilidades familiares y sociales de las personas.

Es obvio que hemos recorrido un camino importante en el que la mujer científica ya no es mirada como una rareza y también ha cambiado su mentalidad, pero también es cierto que el número de mujeres que en la actualidad alcanzan una posición directiva es muy bajo. Poniendo como ejemplo el Centro de Biología Molecular «Severo Ochoa» en el que trabajo, de un total de 50 grupos de investigación, solamente 10 son dirigidos por mujeres, es decir solo el 20%, si bien en los últimos 10 años se ha pasado del 10% al 20%.

¿Como veo a la mujer científica en el mundo actual? Tengo que decir que en la actualidad el número de mujeres que realizan la tesis doctoral en nuestros laboratorios iguala y, en numerosos casos, sobrepasa al número de hombres. La mayoría de estas mujeres se plantean en la actualidad una carrera científica tan seria como la de los hombres. Yo no veo en este momento discriminación frente a las mujeres a la hora de conseguir una beca para hacer la tesis doctoral o para obtener un puesto de trabajo en nuestros centros públicos de investigación. Sin embargo, todavía existen desviaciones, en particular en los puestos más altos. En un artículo reciente se comenta que la mujer forma el 53% de la Universidad, pero sólo ocupan el 34% de las plazas de profesor titular y el 14% de las cátedras. Por otra parte, sólo 10 de los 73 rectores actuales son mujeres y ningún presidente del CSIC ha sido mujer.

De cualquier manera, es evidente que el número de mujeres científicas ha aumentado de una manera espectacular. Me gustaría a modo de ejemplo, presentar los datos de mi propio laboratorio en cuanto a la distribución de hombres y mujeres a lo largo de los años (Figura 1). Lo que ocurre en mi laboratorio no es más que un reflejo de lo que ocurre en otros muchos. También como ejemplo voy a presentar los datos del Centro de Biología Molecular «Severo Ochoa», donde yo trabajo, a lo largo del tiempo (Figura 2). Pero esto no ocurre solo en los laboratorios de investigación. En un hospital de Madrid, hace unos años, de 17 nuevos MIR, 16 eran mujeres. Esto contrasta sin embargo, con el porcentaje de mujeres científicas en puestos directivos en la actualidad. Pero hay que tener en cuenta que hace 30-40 años la

presencia de las mujeres en ciencia era muy reducida y que el acceso a los puestos altos lleva tiempo. Yo soy optimista y, debido al aumento del número de mujeres en los laboratorios de investigación pienso que si las mujeres seguimos luchando e incorporándonos al mundo profesional, en un futuro no muy lejano la mujer investigadora ocupará en la comunidad científica el puesto que le corresponde de acuerdo con su capacidad. Sin embargo, hay que poner una nota de cautela ya que pienso que todavía tenemos que luchar contra la discriminación negativa.

En la última parte de mi conferencia permítanme que resuma mi historia personal, quizás como ejemplo del pasado y presente de la mujer en la ciencia.

Nací en Asturias, en el pequeño pueblo de Canero, cerca de Lluarca. Cuando tenía un año mi familia se trasladó a Gijón, que fue donde me crié, junto a mi hermano y a mi hermana. Mi hermana y yo tuvimos la suerte de que nuestros padres nunca nos discriminaron respecto a mi hermano desde el punto de vista de nuestra formación. Mis padres tenían muy claro que nuestro futuro dependería de nuestro trabajo.

Cuando en el curso preuniversitario tuve que elegir entre ciencias o letras, claramente me decidí por las ciencias. Sin embargo, dentro de las ciencias me atraían tanto las ciencias químicas como la medicina. Finalmente me decidí a proseguir la carrera de Químicas. Realmente, creo que fue una buena elección pues rápidamente me entusiasmó, en particular las largas horas que pasábamos en el laboratorio. Cuando terminé el tercer curso de la licenciatura pensaba que mi futuro podría ser la investigación en Química orgánica. Pero aquel verano tuve la ocasión de conocer a Severo Ochoa, quien influyó decisivamente sobre mi futuro. Una conferencia que dio sobre su trabajo y la conversación que mantuve con Severo Ochoa me fascinaron. Esto, unido a que poco después me envió desde Nueva York un libro de Bioquímica, disciplina que se impartía en el siguiente curso, hicieron que mi vocación se decantase por la investigación bioquímica. Lo que es obvio de mi propia experiencia es que, en la mayoría de los casos, la vocación no

nace sino se hace. Mi vocación hacia la investigación bioquímica surgió debido a que en el momento oportuno conocí a Severo Ochoa. Él me recomendó que, una vez acabada la carrera, hiciese una tesis doctoral en Madrid bajo la dirección de un excelente bioquímico, Alberto Sols, para después marcharme a Nueva York con él al Departamento de Bioquímica de la escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York. Para conseguir que Alberto Sols me admitiese en su grupo de trabajo para realizar una tesis doctoral Ochoa me dio una carta de recomendación para él. Por supuesto, Sols no se pudo negar a algo que le pedía el Premio Nobel Severo Ochoa.

Bastantes años después, con ocasión de recibir yo el Premio Severo Ochoa de Investigación de la Fundación Ferrer, Sols contaba la siguiente anécdota. Cuando Margarita fue a mi laboratorio para pedir sitio para realizar una tesis doctoral pensé: «Bah, una chica. Le daré un tema de trabajo sin demasiado interés pues si no lo saca adelante no importa». Esta anécdota refleja la mentalidad que existía en 1961 respecto a lo que se podría esperar del trabajo científico de una mujer. Es evidente que el propio Sols, al contar esta anécdota, había cambiado ya su modo de pensar, al menos respecto a mi y probablemente respecto a las mujeres científicas en general. Como pueden imaginar, el hecho de ser mujer marcó de un modo importante una parte de mi vida científica por lo que no puedo desligar las experiencias de mi vida dedicada a la investigación científica con mi condición de mujer.

Lo que también quiero resaltar es que mis vivencias científicas de 40 años van unidas a las de Eladio Viñuela, con quien compartí este periodo importante de nuestras vidas. En el año 1964, una vez finalizada la Tesis Doctoral, ambos con Alberto Sols, nos casamos y nos fuimos al departamento de Severo Ochoa en la Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York. Tengo que agradecerle a Ochoa que desde el principio nos puso en grupos de trabajo distintos. Citando textualmente sus palabras, dijo: «Así, por lo menos, aprenderéis inglés». Esta separación creo que más bien reflejaba su interés en que cada uno desarrollásemos nuestra personalidad científica. Yo, en Nueva York, me sentí persona respecto a mi trabajo. Si yo obtenía resultados interesantes, era yo la que los conseguía, y a mí se me reconocía.

Realmente, durante los tres años que estuvimos en Nueva York, no noté la menor discriminación por el hecho de ser mujer.

En 1967, después de tres años en Nueva York, Eladio y yo tomamos la decisión de volver a España, a intentar hacer trabajo de investigación y a desarrollar la biología molecular en nuestro país. Éramos conscientes de que podíamos encontrarnos con un desierto científico, y podría ser difícil o imposible hacer investigación. Por ello, nos planteamos una vuelta condicional. Si las circunstancias no eran favorables para investigar en España, nos volveríamos a Estados Unidos. La primera cuestión que nos planteamos fue el tema de trabajo. Descartamos seguir trabajando en nuestros temas de trabajo respectivos, muy competitivos en aquella época, y decidimos volver a trabajar en un proyecto único pues éramos conscientes de las dificultades que tendríamos al volver a España, y siempre sería más fácil salir adelante si uníamos y complementábamos nuestros esfuerzos.

Habíamos seguido un curso sobre virus bacterianos, en Estados Unidos. Precisamente, el estudio de los virus bacterianos había dado lugar a las primeras aportaciones a la genética molecular en la década de los 50. Decidimos elegir como tema de trabajo el estudio de un virus bacteriano relativamente pequeño, pero morfológicamente complejo, lo que nos daría la posibilidad de profundizar en su estudio a nivel molecular y de desentrañar los mecanismos utilizados por el virus para su morfogénesis, es decir para formar las partículas de virus a partir de sus componentes, proteínas y DNA. El nombre de este virus es ø29. Apoyados por Severo Ochoa, con cuya ayuda conseguimos financiación americana volvimos a España a iniciar nuestra aventura. Partimos de un laboratorio, que tuvimos que equipar, y de entrada estábamos Eladio y yo solos. Afortunadamente, pocos meses después de nuestra vuelta se convocaron las primeras becas del plan de formación de personal investigador, con lo que pudimos seleccionar a nuestro primer estudiante de doctorado, Enrique Méndez. Después de él llegaron Jesús Ávila, Antonio Talavera, Juan Ortín, José Miguel Hermoso y Víctor Rubio. Esta fue nuestra primera generación de estudiantes de doctorado. Quiero resaltar que todos eran chicos, no porque los hubiésemos

buscado expresamente, sino porque ninguna chica vino a pedir trabajo al laboratorio.

De nuestros seis primeros estudiantes de doctorado tres de ellos eran dirigidos más directamente por Eladio y otros tres por mi, si bien ambos interveníamos en los proyectos de todos. Aunque internamente no teníamos ningún problema (yo tengo que decir que en ningún momento sentí discriminación hacia mi por ninguno de mis doctorandos hombres), de cara al exterior yo era la mujer de Eladio Viñuela. De nuevo, como en la época de mi tesis doctoral, yo me sentía discriminada. Eladio, que era una persona muy generosa y que siempre ha hecho todo lo posible para que mi trabajo personal fuese reconocido, estaba tan insatisfecho como yo de esta situación y decidió iniciar un nuevo tema de trabajo relacionado con un problema de mucha importancia en sus tierras extremeñas, el virus de la peste porcina africana, dejando poco a poco el trabajo con el virus bacteriano Ø29 que eventualmente quedó exclusivamente bajo mi dirección. De esa forma yo podría demostrar a mis colegas científicos si yo era capaz de sacar adelante por mi misma un tema de trabajo. Tuve suerte, trabajé mucho, tuve muy buenos colaboradores, Eladio me ayudó y apoyó en todo momento. El caso es que salí adelante y me convertí en una científica cuyo nombre ya no era el de la mujer de... sino el de Margarita Salas.

Durante bastante tiempo me resistí a ocupar puestos científico-administrativos. Era feliz teniendo mi propio grupo de trabajo, dirigiendo investigaciones, y no quería perder tiempo en otras actividades. Sin embargo, llegó la hora en que tuve que ceder en mi resistencia. La primera cesión fue cuando me propusieron la presidencia de la Sociedad Española de Bioquímica en 1988, con una duración de 4 años. Casi al mismo tiempo fui convencida para que aceptase la dirección del Instituto de Biología Molecular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en el Centro de Biología Molecular «Severo Ochoa», también por cuatro años. Posteriormente, en 1992 tuve que aceptar la dirección del Centro de Biología Molecular «Severo Ochoa». Después, pasé a formar parte de la junta de gobierno del CSIC y posteriormente del consejo rector del CSIC.

A partir de un cierto momento, todo lo que había sido negativo para mí por el hecho de ser mujer, se convirtió en positivo. Así pues, si me daban un premio, éste tenía más relevancia porque se lo habían dado por primera vez a una mujer. Aunque mis méritos científicos fueran similares o menores que los de muchos de mis colegas masculinos, yo era noticia, y ellos no.

Yo creo que en mi actual situación profesional han contribuido dos factores: por una parte, la ayuda y el apoyo constantes de Eladio. Él era una persona muy inteligente y brillante y para mí ha sido un estímulo continuo, que ha hecho superarme para tratar de estar a su altura. Por otra parte, el hecho de que yo soy una persona luchadora y trabajadora, que siempre he creído que tenía que ganarme mi puesto en la sociedad a base de mi esfuerzo y trabajo. Yo creo que a la mujer nadie le va a ayudar, nadie le va a regalar nada. Tiene que luchar, con mucha más fuerza y tesón que el hombre, para ocupar la posición que se merezca en cada caso. Hemos necesitado tener una determinación muy clara de que queríamos ser profesionales serias pues si no, la corriente nos habría llevado a resignarnos con nuestra suerte de ser esposas y madres de familia. Yo creo que ambas facetas no deben estar reñidas y se debe poder ser una buena profesional y a la vez tener una familia. Pero también es cierto que se nos tiene que ayudar con facilidades para el cuidado de los niños, con guarderías que incluyan servicios médicos, que no haya discriminación hacia la mujer embarazada a la hora de obtener un puesto de trabajo e incluso de mantenerse en el mismo. Sin embargo, yo no quiero cuotas, quiero que las mujeres luchemos para que se nos considere por lo que valemos. Esta es la clase de feminismo por el que yo siempre he luchado.

Volviendo a mi vida científica, como la vida de otros muchos investigadores, la mía ha tenido muchas satisfacciones; pero también se sufren muchas frustraciones ya que los resultados que se obtienen frecuentemente no son los que uno desearía. Hace falta mucha paciencia y tesón, pero sobre todo mucho entusiasmo, ya que con él se pueden sobrellevar las frustraciones que conlleva una vida dedicada a la investigación. Cuando se obtienen re-

sultados interesantes y/o inéditos se suplen con creces los momentos de desánimo que se puedan tener. Pero aparte de esta alegría por descubrir, la investigación, al menos en mi caso, me ha dado otras dos grandes satisfacciones. Por una parte, una aplicación práctica en biotecnología que ha surgido como resultado de nuestra investigación básica. La DNA polimerasa, que es la proteína encargada de la duplicación del DNA, producida por el virus $\phi 29$, tiene propiedades que la hacen única para la amplificación del DNA. En la actualidad se ha comercializado la DNA polimerasa de $\phi 29$ con muy buenos resultados. Es ciertamente una satisfacción el que, de una investigación básica, se obtenga un resultado práctico de una gran repercusión económica. Y esto es también una buena prueba de algo que decía Severo Ochoa, con lo que estoy absolutamente de acuerdo. Hay que hacer investigación básica de calidad y hay que dejar al investigador libertad para que realice su investigación. De esta investigación básica surgirán resultados prácticos que no son previsibles *a priori* y que redundan en beneficio de la humanidad. Aplicaciones prácticas que ha dado la biología, han surgido como resultado de proyectos de investigación básica. Como es bien sabido de todos y como también decía Severo Ochoa, un país sin investigación es un país sin desarrollo. Es necesario que potenciemos nuestra investigación básica de calidad pues ella será la base para el desarrollo de nuestro país.

Otra gran satisfacción que me ha dado la investigación es la enseñanza, tanto a nivel de licenciatura como a nivel de doctorado y postdoctorado. En relación con la primera, yo impartí durante 23 años la asignatura de Genética Molecular en la Facultad de Químicas de la Universidad Complutense de Madrid. Esto me dio muchas satisfacciones y me permitió seleccionar excelentes estudiantes de doctorado. Durante 40 años de mi vida científica se han realizado en el laboratorio un total de 50 tesis doctorales. Es una enorme satisfacción formar futuros científicos, dirigirlos y alentarlos a lo largo de la tesis doctoral. Pero sobre todo, ser testigo de sus éxitos, muchos de ellos como jefes de grupo con su investigación propia obteniendo importantes resultados científicos.

Quiero resaltar que los 50 doctorandos que se han formado en mi laboratorio, otros muchos doctores que han obtenido una formación postdoctoral y los técnicos que han pasado y/o que están actualmente en el laboratorio formamos una gran familia formada por hijos, nietos y hasta bisnietos científicos. Cuando nos reunimos con ocasión de algún acontecimiento científico y/o personal siento una gran alegría y una enorme satisfacción. El orgullo de ver que los discípulos me han superado.

No quisiera terminar sin expresar mi agradecimiento a mis dos maestros de las fases predoctoral y postdoctoral, Alberto Sols y Severo Ochoa, respectivamente, quienes me enseñaron, no solo la bioquímica y la biología molecular, sino también su rigor experimental, su dedicación y su entusiasmo por la investigación. También quiero agradecer a todos los colaboradores que he tenido a lo largo de los 40 años de trabajo con el virus ø29, ya que de ellos es el mérito de los logros obtenidos. Quisiera aquí agradecer especialmente a mis colaboradores y doctorandos varones pues nunca me sentí discriminada por ellos por el hecho de ser mujer y a mi maestro y amigo Severo Ochoa ya que cuando estuve en su laboratorio me trató como persona, independientemente de mi condición de mujer.

A mis padres por haberme dado la oportunidad de tener una formación que me ha permitido realizar el trabajo que me gustaba. A mis hermanos y amigos, por su ayuda y amistad. A nuestra hija Lucía pues siempre me ha apoyado en mi dedicación a la investigación en mis largas horas de trabajo. Finalmente, y muy en especial, quiero que quede constancia de que Eladio ha sido para mí, no solo un marido, sino también mi mejor amigo y mi mejor maestro. Quiero decir que mi éxito, si lo he tenido, se lo debo a Eladio.

Muchas gracias

Figura 1

Grupo de investigación sobre el bacteriófago ø29

Período	Hombres	Mujeres
1968-1971	7	0
1972-1976	4	2
1977-1981	5	2
1982-1985	4	1
1986-1989	6	3
1990-1993	7	4
1994-1998	6	11
1999-2000	10	12
2001-2002	9	13
2003-2004	9	11
2005-2006	9	10

Figura 2

Centro de Biología Molecular «Severo Ochoa»

Personal científico			Becarios (pre y post)	
Período	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
1983-84	58	18	50	22
1989-90	66	29	99	109
1995-96	89	54	106	147
1997-98	91	47	115	188
1999-00	96	55	142	228
2001-02	95	57	107	193
2003-2004	102 (73+29)	72 (23+49)	105	182

Conclusions de la XXVII Université d'Été d'Andorre*

Sylvie Vauclair

Moderadora de la XXVII Universitat d'Estiu d'Andorra

Divendres 3 de setembre

* Les conclusions, a càrrec de la moderadora Sylvie Vauclair, fan referència únicament a les conferències que van tenir lloc del dilluns 30 d'agost al divendres 3 de setembre, ambdues dates incloses. Les ponències de Juan Antonio Cirac i Albert Fert, presents en aquest volum, es van efectuar fora d'aquestes dates, per aquest motiu no se n'ha comentat el contingut a les conclusions.

Voici la fin de la XXVII Université d'Été d'Andorre, qui s'est déroulée à Andorre la Vieille, du 30 août au 3 septembre 2010, sur le thème : *Ciència i Societat, del Cosmos a l'Àtom passant per la Vida*, « Science et Société, du Cosmos à l'Atome en passant par la Vie », dont j'ai eu le très grand honneur et le très grand plaisir d'être la modératrice.

Il existe des événements dans la vie, des tranches d'existence tellement concentrées et tellement riches qu'on en repart transformés, avec un bouillonnement de nouvelles idées et de nouveaux questionnements. C'est le cas de cette Université d'Été qui vient de se terminer, mais dont la fin représente un nouveau départ, avec pour chacun d'entre nous, une ouverture vers de nouveaux horizons. Nous sommes différents, enrichis de sujets de réflexion de toutes sortes, dont certains pouvaient paraître peu compréhensibles dans le passé et sont à présent, devenus abordables.

Je pense que ceci est vrai aussi bien pour les conférenciers que pour le public. En ce qui me concerne, lorsque je donne une conférence ou que je participe à un débat, je considère l'apport du public et de son questionnement comme fondamental. Une conférence ne représente pas une transmission de savoir à sens unique. C'est un échange, qui conduit à de nouvelles prises de conscience de part et d'autre.

Au cours de cette Université d'Été, nous avons entendu huit conférenciers-conférencières, dont quatre femmes et quatre hommes. J'adresse toutes mes félicitations aux organisateurs et organisatrices de cette manifestation pour avoir su ainsi préserver la parité, ce qui est rare. Contrairement aux idées reçues, il y a beaucoup de femmes dans les disciplines scientifiques, mais elles souffrent souvent, encore maintenant, d'une certaine discrimination.

Elles doivent « prouver plus » pour obtenir la même reconnaissance, lutter contre une attitude parfois condescendante ou ironique de leurs collègues masculins et elles « montent » moins vite que les hommes dans la hiérarchie. Il arrive trop souvent que, en raison de ces difficultés sous-jacentes et du fait qu'elles sont très exigeantes envers elles-mêmes, les femmes renoncent *a priori* à se positionner dans la société selon leur propre niveau. Cette Université d'Été prouve le contraire : merci !

Les huit conférenciers-conférencières invités étaient d'origines très variées et exposaient des thématiques différentes, complémentaires. Je crois qu'ils partageaient tous une même approche dans leurs présentations, à la fois pour eux-mêmes et vis-à-vis du public : celle de la sincérité et de l'honnêteté. Il me semble que nous sommes tous dans une situation de quête profonde, ne serait-ce que la recherche du sens de la vie, et cela se ressent au cours des conférences, comme une profondeur de pensée sous-jacente, présentée par chacun selon ses propres idées, sa propre trajectoire dans la vie.

Sans reprendre l'ensemble de ce qui a été présenté, j'aimerais rappeler que nous avons d'abord appris le fonctionnement des courants océaniques avec notre présidente Josefina Castellví Piulachs, qui nous a aussi fait partager son expérience de chercheuse en Antarctique. Puis Jean-Pierre Changeux a disséqué pour nous le cerveau humain et ses réactions aux stimuli, aux émotions. Lluís Quintana nous a parlé d'un sujet qui nous touche particulièrement : le génome humain et comment son étude permet de retrouver nos filiations ancestrales. Álvaro de Rújula nous a parlé des « particules de Dieu » (pardon, des particules élémentaires et plus spécialement du *boson de Higgs*) et nous avons appris, avec Magda Marquet Mandicó, le comportement des virus et l'utilisation possible du tabac pour des vaccins. Restait la Terre dans l'Espace, les étoiles et les exoplanètes, dont je vous ai parlé moi-même. Et puis, pour terminer, Jean Bricmont nous a présenté un brillant plaidoyer pour s'élever contre tous ceux qui estiment que science et religion peuvent cohabiter, exposé qui fut suivi d'une âpre discussion. Finalement, Margarida Salas a parlé de la place

des femmes dans la société et dans la recherche et, de sa propre expérience dans ce domaine.

Des discussions informelles entre les conférenciers et le public ainsi que la table ronde ont permis d'approfondir un peu le contexte « société ». Chaque intervenant s'est exprimé sur la base de trois grands thèmes.

Tout d'abord, après une présentation claire et concrète de ce en quoi consiste pour chacun le travail de recherche « au jour le jour », la question suivante a été posée : « Y a-t-il une évolution générale de la recherche scientifique et comment cette évolution est-elle ressentie dans les disciplines concernées ? ». Les discussions ont rapidement convergé sur le fait que la manière de procéder dans la recherche scientifique a beaucoup changé en quelques années. On est loin, à présent, des découvertes faites par un individu solitaire. Les travaux se font en équipes parfois très importantes, avec des manipulations de grandes bases de données. L'archétype populaire du « savant » ne représente plus la réalité actuelle, même si cette image perdure dans les médias et l'inconscient collectif.

Une deuxième ligne de réflexion s'est articulée autour du fait que, dans le public et les milieux politiques, on confond souvent science et technologie. Il faut distinguer la recherche fondamentale qui consiste à mieux comprendre le monde dans lequel nous vivons, la recherche appliquée, qui consiste à fabriquer de nouveaux objets, toujours plus complexes, utiles ou non à l'être humain, et la technologie, qui consiste à fabriquer des outils permettant d'aller plus loin dans les autres types de recherche. Ces trois disciplines sont interdépendantes et n'existeraient pas l'une sans l'autre. La difficulté vient de ce que, dans la société, l'accent est mis sur les applications à retombées économiques rapides et à court terme. Ne pas favoriser suffisamment la recherche de base, fondamentale, sur le long terme peut conduire à une saturation et diminuer l'efficacité globale. Ce n'est pas en améliorant la bougie qu'on a inventé l'électricité...

Enfin, un besoin urgent de réflexion philosophique et sociologique par rapport à l'évolution très rapide des connaissances scientifiques se fait toujours sentir. Ce sujet est déjà traité par les divers comités d'éthique et dans de nombreux cadres. Mais cela donne l'impression de partir un peu dans tous les sens sans vraiment converger. Qui peut aider à la prise de conscience et à la responsabilisation de l'humanité ? Les philosophes contemporains sont-ils à la hauteur ?

Cette discussion ne pouvait pas aboutir à une finalisation, car le temps nous était limité. C'est un départ, l'important étant d'aller chacun de son côté avec toutes ces idées, de les digérer et de les utiliser à bon escient dans son propre environnement.

Nous allons donc à présent nous quitter. Madame la présidente Josefina Castellví Piulachs se chargera de remercier tous les organisateurs et les intervenants de cette Université d'Été, mais je voudrais déjà, en mon nom personnel remercier le gouvernement d'Andorre de m'avoir invitée à modérer cette passionnante rencontre. Je voudrais aussi remercier les organisatrices de leur magnifique travail, en particulier Maria Àngels Vilana qui a eu fort à faire avec ces scientifiques au caractère bien trempé et parfois difficiles à gérer, dont je fais partie. Merci !

Je vais à présent laisser la place à madame la Ministre et Madame la présidente pour la clôture officielle de la XXVII Université d'Été d'Andorre.



Recherche et applications : du spin de l'électron à nos ordinateurs et téléphones

Albert Fert

Doctor en ciències físiques, especialista de la física de la matèria condensada i de l'electrònica de l'spin. Catedràtic de la Universitat París-Sud 11 i director científic de la unitat mixta de recerca CNRS/Thales. Medalla d'or del CNRS (2003). L'any 2007 obté el premi Wolf, el premi del Japó i el premi Nobel de Física pel descobriment de la magnetoresistència gegant.

Dijous 16 de setembre

I Introduction

Créer un courant électrique en déplaçant des électrons à l'aide de la force exercée par un champ électrique sur la charge de l'électron, c'est le principe de base de l'électronique conventionnelle. Cependant, l'électron possède non seulement une charge électrique mais aussi un spin, une propriété quantique qui peut se décrire comme un minuscule aimant porté par l'électron. L'électronique conventionnelle ignore le spin mais il y a maintenant un nouveau type d'électronique appelée spintronique qui exploite non seulement la charge mais aussi le spin des électrons. Son développement a suivi la découverte de la magnétorésistance géante (GMR) en 1988^{1,2}. Le concept général de la spintronique est de placer des matériaux ferromagnétiques sur le trajet des électrons et d'utiliser l'influence du spin sur la mobilité des électrons dans ces matériaux. Cette influence, d'abord suggérée par Mott³ en 1936, a été ensuite démontrée expérimentalement et décrite théoriquement à la fin des années 60^{4,5}. La découverte de la GMR a conduit rapidement à des applications importantes, notamment pour ce qui est la lecture des disques durs des ordinateurs. De nombreux autres phénomènes qui exploitent aussi le spin des électrons se sont ensuite révélés et, aujourd'hui, la spintronique se développe dans de très nombreuses directions : magnétorésistance tunnel, phénomènes de transfert de spin, spintronique avec semi-conducteurs, spintronique moléculaire, spintronique avec multiferroïques, etc.

II Les racines de la spintronique

L'existence de courants polarisés en spin, initialement suggérée par Mott³, a été démontrée par des expériences et décrite par des modèles théoriques il

Il y a environ 30 ans, essentiellement par des chercheurs Européens à Orsay⁴, Strasbourg⁵ ou Eindhoven. Dans des métaux ferromagnétiques comme le fer ou le cobalt, le spin d'un électron peut être dirigé vers le pôle Nord de l'aimantation ou dans la direction opposée ; on parle d'électrons de « spin majoritaire » ou de « spin minoritaire » et de canaux de conduction de « spin majoritaire » ou de « spin minoritaire ». En bref on peut décrire la conduction dans un matériau magnétique comme une conduction en parallèle par deux canaux de conductivités différentes, cette différence ayant pour origine générale le décalage des énergies des électrons des deux directions de spin (voir figure 1a-b). De très forts contrastes de conductivité entre les deux canaux peuvent aussi être obtenus en dopant le matériau avec des impuretés qui introduisent des sections efficaces de freinage des électrons très différentes pour les deux directions de spin. On peut voir sur la figure 1c) que dans du nickel dopé avec des impuretés de Co ou Fe, la résistance électrique est beaucoup plus faible (environ 20 fois) dans le canal de spin minoritaire ou spin down. Pour des impuretés de Cr ou V au contraire, la résistance électrique est plus faible dans le canal de spin up.

III Le concept de la GMR dans des expériences sur des alliages magnétiques ternaires

Des expériences sur des alliages ternaires⁴ réalisées bien avant la découverte de la magnétorésistance géante (GMR) anticipaient déjà la GMR, comme l'illustre la figure 2. Supposons, par exemple, que l'on dope du nickel à la fois avec des impuretés de Co, qui freinent fortement les électrons dans le canal de spin↑ en laissant le canal de spin relativement « ouvert », et des impuretés de Rh pour lesquelles c'est l'inverse. Dans l'alliage Ni(Co + Rh), que nous appellerons de type #1, les électrons des deux canaux sont alors fortement freinés, soit par les impuretés de Co dans un canal, soit par celles de Rh dans l'autre. Il n'y a plus de canal « ouvert », et la résistivité est fortement augmentée par rapport à celle d'alliages contenant seulement soit Co soit Rh. Au contraire, il n'y a pas cette augmentation de résistivité pour des alliages de type #2 dopés par des impuretés (Co et Au sur l'exemple de

la figure) qui, toutes deux, freinent les électrons d'un même canal et laissent le deuxième canal relativement libre.

L'idée de la GMR est de remplacer les impuretés A et B de l'alliage ternaire par deux couches magnétiques F1 et F2 d'un même métal ferromagnétique séparées par une couche non-magnétique. Si les deux couches ont leurs aimantations dans des directions opposées (configuration dite antiparallèle), la couche F1 freinera les électrons d'un canal, la couche F2 ceux de l'autre canal et on retrouve donc la situation de résistivité élevée d'un alliage ternaire de type #1 dans lequel les électrons des deux canaux sont freinés, par les impuretés A dans l'un, les impuretés B dans l'autre. Par contre la configuration d'aimantations parallèles correspond à l'alliage de faible résistivité de type #2 dans lequel les impuretés A et B laissent un des canaux relativement libre. L'élément nouveau vient de la possibilité de passer de grande à petite résistivité en appliquant un champ magnétique pour aligner les aimantations d'une configuration initialement antiparallèle.

Cependant, les équations de transport nous disent que les électrons ne pourront sentir l'orientation relative des aimantations des couches F1 et F2 que si la distance entre les couches est inférieure au « libre parcours moyen » des électrons, c'est-à-dire, en pratique, dans des films métalliques si cette distance n'est que de quelques nanomètres. Malheureusement, en 1970, il n'était pas techniquement possible de fabriquer des multicouches constituées de couches épaisses de seulement quelques nanomètres. Il fallut attendre le milieu des années 80 pour exploiter les progrès technologiques, réaliser de telles multicouches et découvrir la GMR. La spintronique suivra.

IV La découverte de la GMR

Au milieu des années 80, avec le développement de techniques de dépôt sous ultra-vide comme l'Épitaxie par Jet Moléculaires (EJM) (voir figure 3), il devint possible de fabriquer des multicouches empilant des couches ultra-fines et d'envisager l'extension des expériences de ma thèse sur des alliages

ternaires à des multicouches magnétiques. De plus, en 1986, les expériences de diffusion Brillouin de Peter Grünberg⁶ révélèrent l'existence d'un « couplage d'échange » antiferromagnétique entre couches de fer séparées par de très fines couches de chrome. Une multicouche Fe/Cr pouvait donc donner la possibilité de commuter d'une configuration à aimantations opposées à une autre à aimantations parallèles par application d'un champ magnétique. À cette époque, j'avais justement discuté de l'intérêt des multicouches magnétiques avec Alain Friederich du LCR Thomson-CSF et une collaboration s'était établie entre mon équipe d'Orsay et la sienne pour l'élaboration de telles couches. Patrick Etienne, l'expert EJM au LCR, adopta sur les métaux les techniques mises au point pour les semi-conducteurs et guida les premières fabrications de multicouches Fe/Cr de la thèse de Frédéric Nguyen Van Dau. Cela conduisit rapidement à nos premières observations (figure 4a) de la GMR sur des super-réseaux Fe/Cr(001) au début de l'année 1988¹. Des résultats semblables sur des tricouches F/Cr/Fe furent obtenues à peu près simultanément dans l'équipe de Peter Grünberg à Jülich².

L'interprétation de la GMR est en gros semblable à celle des expériences sur des alliages ternaires que nous avons décrites plus haut et est schématisée dans la figure 4b. Un modèle classique de la GMR fut publié dès 1989 par Camley et Barnas⁷. Vint ensuite un modèle quantique que je publiais avec Levy et Zhang en 1991⁸.

V L'âge d'or de la GMR

La découverte de la GMR attira rapidement l'attention, aussi bien pour ses possibilités d'application que pour l'intérêt fondamental d'expériences de transport exploitant le spin. Les études GMR se multiplièrent dans de nombreux laboratoires et notre petite équipe se lança aussi avec enthousiasme, dans l'exploration de ce nouveau champ de recherche qui allait s'appeler bientôt spintronique. Sur le plan expérimental, deux importants résultats furent publiés en 1990. Stuart Parkin *et al.*⁹ démontrèrent l'existence de GMR

dans des multicouches Fe/Cr, Co/Ru et Co/Cr élaborées par la méthode plus simple et plus rapide de pulvérisation cathodique. Ils découvrirent aussi une oscillation de la GMR en fonction de l'épaisseur des couches d'espacement (Cr ou Ru). L'oscillation traduit la succession périodique d'épaisseurs dans lesquelles l'interaction entre couches magnétiques est antiferromagnétique (ce qui donne de la GMR) et des épaisseurs à interaction ferromagnétique (sans GMR). Cette variation oscillante de l'interaction entre couches a une origine semblable à celle de l'interaction dite RKKY entre impuretés magnétiques dans un métal. De même en 1990, l'équipe de Jean-Pierre Renard à Orsay et celle de Teruya Shinjo à Kyoto démontrèrent que les effets GMR pouvaient aussi être obtenus dans des multicouches sans couplage d'échange antiferromagnétique mais étaient composées de couches magnétiques de coercivités différentes¹⁰⁻¹¹. Un autre résultat important, en 1991, fut aussi l'observation d'effets GMR grands et oscillants dans Co/Cu qui deviendra un archétype de système GMR¹². En 1991 également, Bernard Dieny et l'équipe d'IBM Almaden¹³ montrèrent la possibilité de détecter de très petits champs magnétiques par GMR dans des tricouches dites *spin valve*, aujourd'hui à la base de nombreux dispositifs¹⁴. Parallèlement à l'exploration de la GMR dans de nombreux types de structures, un gros effort de recherche fut fait pour le développement de modèles théoriques et notamment de modèles s'appuyant sur des déterminations *ab initio* de la structure électronique des multicouches.

L'application la plus connue de la GMR est la lecture des disques durs¹⁴ où les capteurs GMR à structure *spin valve* (voir figure 5) ont remplacé la magnétorésistance classique. La GMR, grâce à sa sensibilité et aux possibilités amenées pour la miniaturisation des capteurs, a rendu possible une forte réduction de la taille des inscriptions magnétiques et a ainsi conduit à une augmentation de la capacité d'information stockée dans les disques de plus de deux ordres de grandeur (de ≈ 1 à ≈ 800 Gbit/in² en 2009). Cette augmentation a conduit non seulement à la réalisation de disques de très grande capacité (jusqu'au téra-octet) mais aussi à la réalisation de disques de la taille de pièces de monnaie pour l'électronique nomade, i-pods, ap-

pareils photographiques, etc. Les capteurs GMR ont aussi des applications dans l'industrie automobile et les technologies biomédicales.

VI Jonctions tunnel magnétiques et mémoires vives magnétiques (MRAM pour Magnetic Random Access memory)

La jonction tunnel magnétique (Magnetic Tunnel Junctions ou MTJ) est le second type de dispositif de spintronique qui aura bientôt des applications importantes. Une MTJ (figure 6a) est composée de deux couches d'un conducteur ferromagnétique (électrodes) séparées par une très fine couche (barrière) d'un isolant, comme l'alumine par exemple. Les électrons peuvent franchir par effet tunnel la couche isolante et, parce que la probabilité de passage par effet tunnel dépend du spin quand l'électrode est ferromagnétique, la résistance de la MTJ dépend de l'orientation relative des aimantations des électrodes. Les meilleures performances sont aujourd'hui obtenues avec des MTJ à barrière tunnel de l'oxyde MgO, la variation de résistance en fonction de l'orientation relative de l'aimantation des électrodes pouvant être d'un facteur 10.

Des MTJ de très petite taille, de quelques dixièmes de micron, peuvent être fabriquées par des techniques de lithographie et ces MTJ de petite taille sont à la base d'un nouveau type de mémoire d'accès rapide représenté sur la figure 6b, les MRAM (Magnetic Random Acces Memory) mises sur le marché depuis 2006. Les états « 0 » et « 1 » d'un élément de mémoire correspondent aux configurations parallèles et antiparallèles d'une MTJ. La partie inférieure de la figure représente une MRAM composée d'un réseau de MTJ connecté à de *bit lines* et *word lines* qui permettent l'écriture et la lecture d'une cellule mémoire donnée.

La première génération de MRAM, basée sur une écriture par le champ magnétique créé par une impulsion de courant dans les *bit lines* et *word lines*, a eu un impact limité sur la technologie des ordinateurs. Ces MRAM sont surtout utilisées pour des applications en avionique et dans le domaine

spatial en raison de leur insensibilité aux rayons cosmiques de la haute atmosphère. On attend un impact plus général sur la technologie des ordinateurs de la prochaine génération qui utilisera une écriture par le phénomène de transfert de spin, c'est-à-dire par un transport d'aimantation par un courant électrique polarisé en spin. Ce type d'écriture permet une diminution importante de la consommation d'énergie. Les MRAM annoncées par les industriels devraient avoir des densités et des temps d'accès semblables à ceux des mémoires d'accès rapide actuelles de type DRAM ou SRAM, mais le principal avantage des MRAM sur ces mémoires volatiles à base de semi-conducteurs est leur caractère de mémoire permanente (ou non-volatile) qui conserve l'information même quand l'ordinateur (ou le téléphone portable) n'est pas sous tension. Les MRAM permettront d'éliminer, par exemple, le temps aujourd'hui nécessaire pour charger (*booster*) le système d'exploitation à la mise en marche des ordinateurs actuels. Les MRAM seront également moins gourmandes en énergie que les DRAM ou SRAM actuelles dont il faut « rafraîchir la mémoire » environ tous les millièmes de seconde. Elles seront donc très intéressantes pour tout ce qui est électronique nomade, ordinateurs ou téléphones portables, agenda électroniques, etc.

Il existe aujourd'hui deux autres types de mémoires non-volatiles, les mémoires FLASH à base de semi-conducteurs et les FRAM qui utilisent des matériaux ferroélectriques. Les mémoires FLASH sont utilisées, par exemple, pour stocker les images dans un appareil photo numérique ou des documents dans une « clé-mémoire ». Les MRAM devraient avoir, par rapport aux FLASH, un avantage très net en terme de vitesse d'écriture et, par rapport aux FRAM un avantage également net en terme de durée de fonctionnement et de capacité d'intégration.

VII Perspectives et conclusion

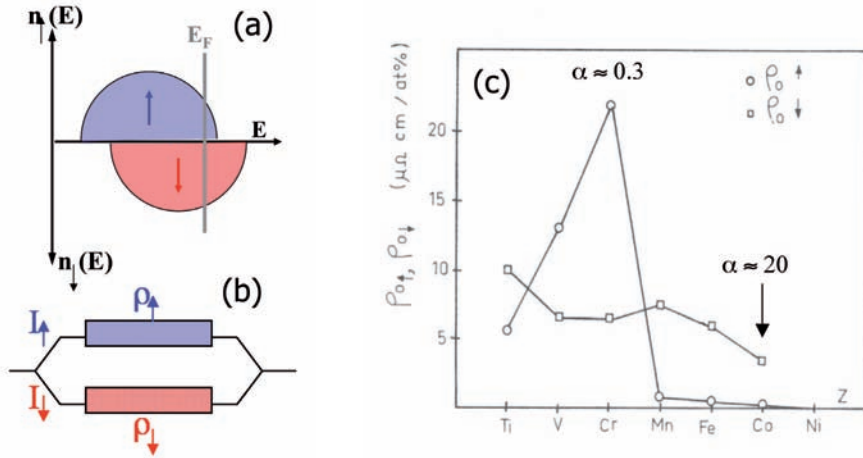
La découverte de la GMR est venue de la rencontre entre des progrès technologiques et une base de physique fondamentale décrivant l'influence du

spin sur le transport électronique dans les matériaux ferromagnétiques. On réalisa rapidement les applications importantes qu'on pouvait tirer de l'exploitation simultanée de la charge et du spin des électrons, et cela déclencha une recherche active qui révéla d'autres phénomènes exploitant également l'influence du spin en électronique. J'ai limité l'article aux développements classiques de la spintronique et aux applications existantes, têtes de lecture de disques durs, mémoires MRAM. D'autres phénomènes sont apparus ensuite et auront d'autres applications. Ainsi, les phénomènes de transfert de spin seront appliqués à une écriture purement électronique de mémoires magnétiques ou à la génération d'ondes radio pour les télécommunications. La spintronique à un électron est une des voies possibles pour l'ordinateur quantique. La spintronique, dans des circuits à base de nanotubes de carbone (figure 7) ou de graphène, est une voie prometteuse pour prendre le relais de l'électronique conventionnelle à base de semi-conducteurs qui atteindra ses limites dans une dizaine d'années. La spintronique se développe maintenant sur de très nombreux nouveaux axes et sera très certainement à la base d'applications technologiques dans de multiples domaines.

Références

- [1] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988)
- [2] G. Binash, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, *Phys. Rev. B* **39**, 4828 (1989)
- [3] F. Mott, *Proc. Roy. Soc. A* **153**, 699 (1936)
- [4] A. Fert and I. A. Campbell, *Phys. Rev. Lett.* **21**, 1190 (1968)
- [5] B. Loegel and F. Gautier, *J. Phys. Chem. Sol.* **32**, 2723 (1971)
- [6] P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Young, M. B. Brodsky, H. Sowers, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2442 (1986)
- [7] R. E. Camley, J. Barnas, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 664 (1989)
- [8] P.M. Levy, S. Zhang, A. Fert, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1643 (1990)
- [9] S.S.P. Parkin, N. More, K.P. Roche, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2304 (1990)
- [10] T. Shinjo and H. Yamamoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **59**, 3061 (1990)
- [11] C. Dupas, P. Beauvillain, C. Chappert, C. Chappert, J.P. Renard, F. Triguí, P. Veillet, E. Velu, D. Renard, *J. Appl. Phys.* **67**, 5680 (1990)
- [12] D. H. Mosca, F. Petroff, A. Fert, P. A. Schroeder, W. P. Pratt, R. Loloee, *J. Magn. Magn. Mater.* **94**, L1 (1991). S. S. P. Parkin, R. Bhadra, K. P. Roche, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2152 (1991)
- [13] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, D. Mauri, *Phys. Rev. B* **43**, 1297 (1991).
- [14] C. Chappert, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, *Nature Materials*, vol 6, 813 (2007)
- [15] L.H. Hueso, J.M. Pruneda, V. Ferrari, G. Burnell, J.P. Valdés-Herrera, B.D. Simons, P.B. Littlewood, E. Atacho, A. Fert, N.D. Mathur, *Nature* **445**, 410 (2007)

Figure 1

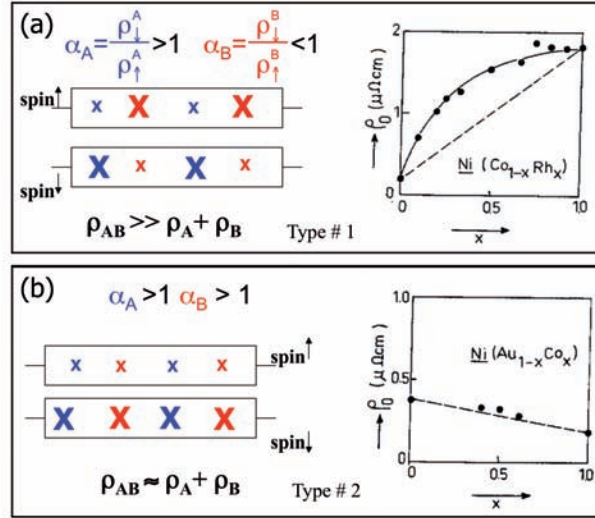


(a) Représentation schématique des bandes d'énergie décalées pour les électrons de spin majoritaire (spin $\uparrow$, en bleu) et minoritaire (spin $\downarrow$ en rouge) dans un métal ferromagnétique.

(b) Illustration de la conduction par deux canaux pour les électrons de spin $\downarrow$ et spin $\uparrow$ (les canaux sont indépendants pour $\rho_{\uparrow\downarrow} = 0$ dans le formalisme de Ref.[4]). Selon le métal on peut avoir $\rho_{\downarrow} > \rho_{\uparrow}$ ou $\rho_{\downarrow} < \rho_{\uparrow}$ pour les résistivités des deux canaux.

(c) Résistivités des canaux de spin $\downarrow$ et spin $\uparrow$ pour du nickel dopé avec 1% de différentes impuretés (mesures à 4.2 K)⁴. La présence d'impuretés freine le courant dans un métal et, à basse température, est l'origine principale de la résistivité électrique. Dans les cas d'un métal ferromagnétique, une impureté peut freiner très différemment les électrons de spin $\downarrow$ et spin $\uparrow$. Comme on le voit sur la figure, le rapport α entre les résistivités $\rho_{0\downarrow}$ et $\rho_{0\uparrow}$ des canaux de spin $\downarrow$ et spin $\uparrow$ peut être aussi élevé que 20 pour des impuretés de Co ou plus petit que 1 pour des impuretés de Cr ou V).

Figure 2

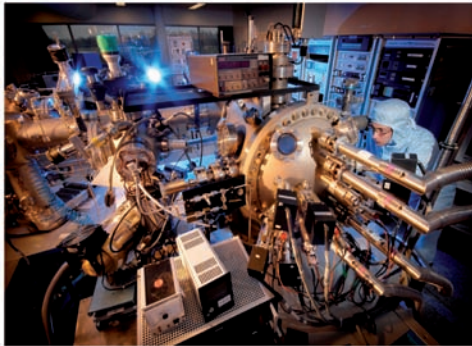


Expériences sur des alliages ternaires basées sur le même concept que la GMR⁴. Sur les schémas illustrant la conduction par deux canaux on a représenté l'efficacité plus ou moins grande d'une impureté au freinage des électrons par des **X** (représentatifs d'obstacles) plus ou moins grands.

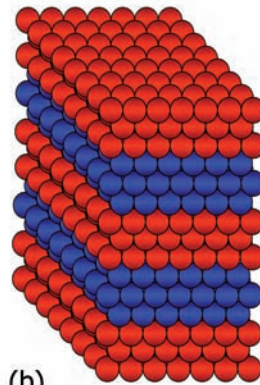
(a) Schéma pour la conduction dans des alliages dopés avec des impuretés diffusant les électrons avec des asymétries en spin opposées ($\alpha_A = \rho_{A\downarrow}/\rho_{A\uparrow} > 1$, $\alpha_B = \rho_{B\downarrow}/\rho_{B\uparrow} < 1$, $\rho_{AB} \gg \rho_A + \rho_B$) et résultats expérimentaux pour des alliages $\text{Ni}(\text{Co}_{1-x}\text{Rh}_x)$ ⁴.

(b) Même schéma qu'en (a) pour des alliages dopés avec des impuretés diffusant les électrons avec des asymétries en spin semblables ($\alpha_A = \rho_{A\downarrow}/\rho_{A\uparrow} > 1$, $\alpha_B = \rho_{B\downarrow}/\rho_{B\uparrow} > 1$, $\rho_{AB} \approx \rho_A + \rho_B$) et résultats expérimentaux pour des alliages $\text{Ni}(\text{Au}_{1-x}\text{Co}_x)$ alloys. Pour la GMR les impuretés A et B sont remplacées par des couches magnétiques F1 et F2 d'un même métal ferromagnétique, les situations (a) et (b) correspondant respectivement aux configurations antiparallèles et parallèles des aimantations des couches F1 et F2.

Figure 3



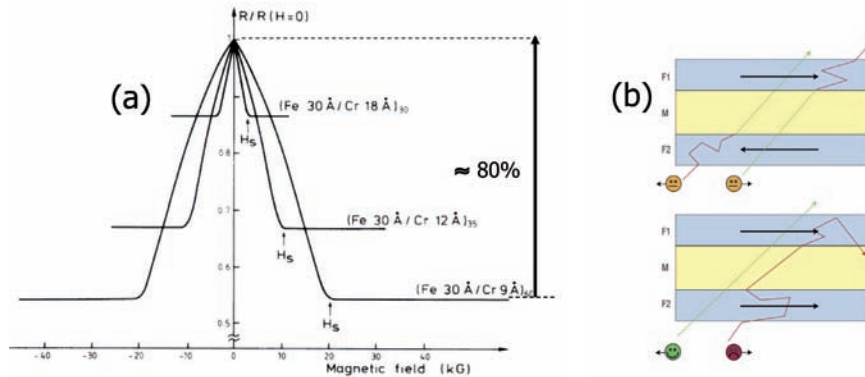
(a)



(b)

À gauche, bâti d'Épitaxie par Jets Moléculaires permettant la croissance de multicouches métalliques magnétiques (cliché CNRS/Thales). À droite, croquis d'une multicouche alternant des couches de fer et de chrome. Les boules rouges (bleues) représentent de atomes de fer (chrome).

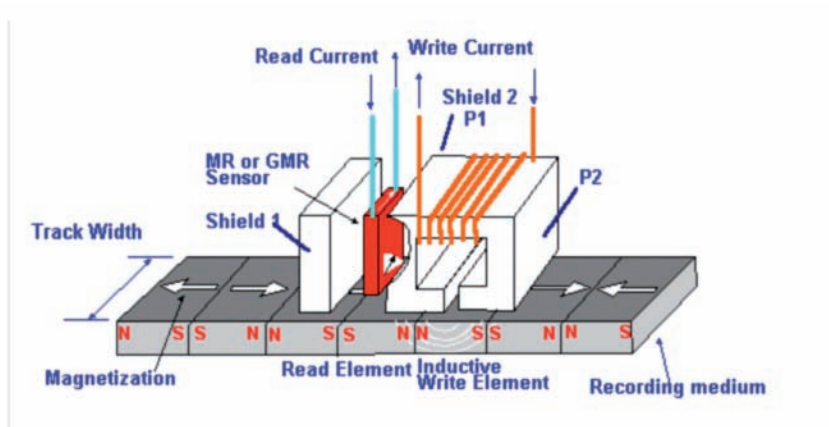
Figure 4



(a) Premières observations de magnétorésistance géante à Orsay sur des multicouches Fe/Cr(001)¹. La résistance, mesurée pour un courant parallèle aux couches, chute quand un champ magnétique aligne les aimantations. Avec la définition adoptée aujourd'hui pour le rapport de magnétorésistance, $MR = 100(R_{AP} - R_P)/R_P$, MR vaut 80% pour la multicouche (Fe 3nm/ Cr 0.9nm).

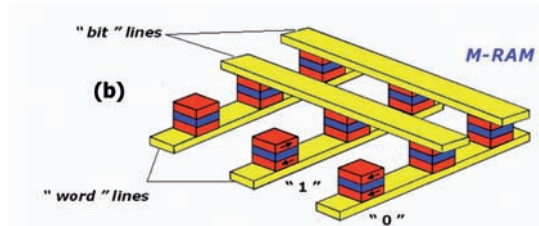
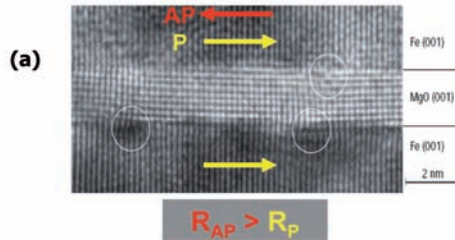
(b) Schéma du mécanisme de la GMR : dans la configuration magnétique parallèle (bas), les électrons d'une direction de spin peuvent traverser facilement toutes les couches magnétiques et le court-circuit, par ce canal, conduit à une valeur petite de la résistance. Dans la configuration antiparallèle (haut), les électrons de chaque canal sont ralentis une fois sur deux en traversant les couches magnétiques et la résistance est élevée. Les trajectoires des électrons sont représentées de façon obliques car, même pour un courant parallèle aux couches, c'est seulement la direction moyenne des vitesses qui est parallèle aux couches. On passe d'une configuration antiparallèle à parallèle par application de champ magnétique.

Figure 5



Tête de lecture à magnétorésistance géante (GMR) pour disque dur. En rouge la multicouche magnétique dont l'effet GMR permet de détecter les champs magnétiques générés par les pôle Nord (N) et Sud (S) des inscriptions magnétiques sur le disque. À gauche du capteur GMR, la tête d'écriture classique.

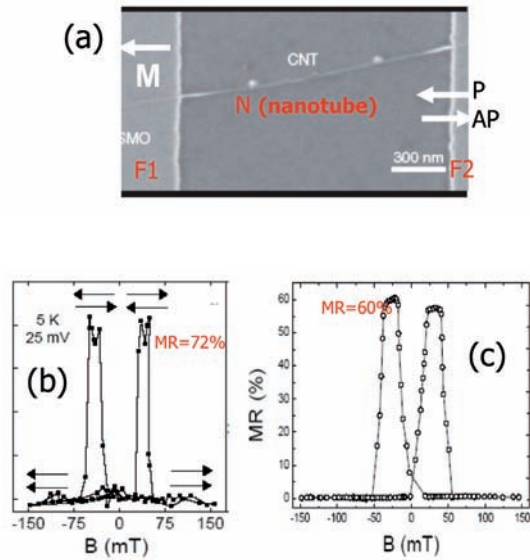
Figure 6



(a) Cliché de microscopie électronique d'une jonction tunnel magnétique composée d'une couche d'oxyde MgO isolante entre deux couches de fer. On peut distinguer l'arrangement cristallin des atomes de MgO et Fe. La résistance « tunnel » entre les deux couches de fer est différente pour les configurations parallèles (P) et antiparallèles (AP) des aimantations des couches de fer.

(b) Arrangement de jonctions tunnel constituant les cellules mémoire d'une M-RAM.

Figure 7



(a) Image¹⁵ par microscopie électronique d'un nanotube de carbone entre contacts (source et drain) de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LSMO).

(b) et (c) Magnéto-résistances de 60% et 72% avec des structures du type (a)¹⁵.

Annals disponibles a la venda:

Annals 1984: <i>Fenòmens de desigualtats a partir del segle XIII.</i>	10,40 €
Annals 1985: <i>Fenòmens de desigualtats</i>	10,40 €
Annals 1986: <i>Andorra i la Comunitat Econòmica Europea</i>	9 €
Annals 1991: <i>A l'entorn d'una constitució</i>	4,80 €
Annals 1992: <i>Ètica i comunicació</i>	4,80 €
Annals 1993: <i>Europa, segle XXI.</i>	4,80 €
Annals 1994: <i>El futur de l'ensenyament</i>	9 €
Annals 1995: <i>Modernitat i religió</i>	4,80 €
Annals 1996: <i>Els límits de la democràcia</i>	6 €
Annals 1997: <i>La ciència, al servei de l'home?</i>	6 €
Annals 1998: <i>La paradoxa del progrés.</i>	6 €
Annals 1999: <i>Mestissatge cultural</i>	6 €
Annals 2000: <i>Creacions artístiques</i>	6 €
Annals 2001: <i>Pluralitat de Llengües</i>	7 €
Annals 2002: <i>Globalitzacions</i>	7 €
Annals 2003: <i>Patrimoni natural i cultural</i>	9 €
Annals 2004: <i>Individu i societat</i>	7 €
Annals 2005: <i>Grandeses i Misèries del segle XX</i>	8 €
Annals 2006: <i>La immigració, una oportunitat?</i>	8 €
Annals 2007: <i>La igualtat té sexe?</i>	8 €
Annals 2008: <i>L'ànima de la humanitat, el patrimoni cultural immaterial</i>	8 €
Annals 2009: <i>El món. Un mosaic de cultures. Divergències o valors comuns?</i>	8 €

Per adquirir els annals o per a qualsevol informació adreceu-vos a:

Universitat d'Estiu d'Andorra

Ministeri d'Educació i Cultura
Govern d'Andorra
Av. Rocafort 21-23, Edifici El Molí
AD600 Sant Julià de Lòria
Principat d'Andorra

Tel. (376) 743 300
universitat_estiu@govern.ad
www.universitatestiu.ad

Els textos de la XXVII Universitat d'Estiu d'Andorra –en format PDF– estan disponibles en el web.

