

الفصل الثالث

تهذيب خرائط هيرودوت

تصور الرحالة الاغريقى هيرودوت أنه يعرف العالم جيداً . ساح حول البحر المتوسط، وسمع كثيراً عن رحلات الفينيقيين داخل أفريقيا . جمع ما عرفه عن معالم الكرة الأرضية ، ليقرر أن طول أوروبا يعادل طول أفريقيا وآسيا مجتمعتين ، أما عرضها فهو ، فى رأى ، ليس مما يدخل فى مجال المقارنة . وضع هيرودوت العلاقات بين الأشياء فى موضعها الصحيح تقريباً ، لكن المسافات بينها كانت خاطئة لحد كبير .

ظل رسم الخرائط ، لألفى سنه ، يتم بالطرق الاغريقية . كانت الخرائط أشياء نسبية تتم بمحاولة توفيق المعالم سويًا دون قياس للمسافات الواقعية . كانت المواقع المألوفة تحتل مكاناً على الخريطة أكبر بكثير مما تستحقه . ولم تكن خرائط العصور الوسطى أفضل كثيراً . قد نذكر الصورة العامة لأفريقيا ، لكنها صورة مشوهة للغاية . كان ادراك راسمى الخرائط للبعد يحدده الزمن الذى تستغرقه الرحلة بين نقطتين ، لا المسافة الواقعية بينهما .

وعلم الوراثة ، كالجغرافيا ، يدور حول الخرائط - خريطتنا الوراثة . ابتكرت الساعات الدقيقة والبوصلة بعد هيرودوت بألفى سنه ، ولم يكن من المستطاع حتى

ذلك الحين أن نقيس المسافات الواقعية على سطح الأرض . وما أن اكتملت صناعة هذه الأدوات حتى بدأت الخرائط الجيدة فى الظهور - لتصبح خرائط هيرودوت مضحكة . يحدث نفس الشيء الآن فى البيولوجيا . فالوراثيون على ما يبدو كانوا حتى عهد قريب يكررون نفس أخطاء قدامى الإغريق .

ومثلما كان الحال فى رسم خريطة العالم ، كان على التقدم فى رسم الخرائط الجينية أن ينتظر التكنولوجيا . أما وقد تحققت الآن هذه التكنولوجيا فقد بدأ شكل الأطلس البيولوجى فى التغير السريع . فما كان يبدو منذ عقدين خريطة بسيطة للطاقم الوراثى يعول عليها (جاءت عن وراثة معالم مثل لون البسلة أو الأمراض الوراثية) قد أصبح الآن يبدو مشوها جدا .

اكتشف مورجان ، بذبابته ، عددا كبيرا من الصفات التى تسلك السلوك المندىلى : لم يكن ثمة تلازم بينها عند الانتقال عبر الأجيال . وكان هناك استثناء كبير . ثمة مجاميع معينة من الصفات - تلك المرتبطة بالجنس - لم تكن تسلك هذا السبيل . وجد مندل أن النسب الموروثة للون البسلة لم تكن تتأثر بما إذا كانت البذرة مستديرة أو مجمدة . واكتشف مورجان أزواجا من الصفات (كلون العين والجنس) كثيرا ما تنتقل سويا خلال الأجيال . وبسرعة اكتشف كثيرا من الصفات المختلفة بذبابه الفاكهة (كصفات لون العين والجناح المختزل والشعر المنشعب) تشترك مع الجنس ومع كروموزوم س فى نمط التوريث . كانت - فى تحد واضح لقواعد مندل - غير مستقلة ، أو كانت - إذا استخدمنا مصطلح مورجان - مرتبطة .

وفى سنين قليلة ظهرت صفات أخرى تنتقل سويا ، ليست بالضرورة على كروموزوم الجنس . أجريت تجارب تربية مجهزة تضمنت ملايين الذباب ، ليتضح أنه من الممكن ترتيب كل جينات الدروسوفيلا فى مجاميع ، بناء على ما إذا كانت تورث مستقلة (بالأسلوب المندىلى) أم لا . البعض من مجاميع الصفات يسلك بالضبط السلوك الذى يتوقعه مندل ، والبعض الآخر تنحرف فيه الصفات الآتية من أحد

الأبوين إلى أن تبقى سويا في النسل وفي الأجيال التالية . كانت الجينات التي تتحكم في مثل هذه المجموع الأخيرة جينات من نفس المجموعة الارتباطية - كما أسماها مورجان . ثم اتضح أن عدد المجموع الارتباطية مساوٍ لعدد الكروموزومات . كان هذا الكشف هو بداية رسم خريطة الارتباط للدروسوفيلا ، وأصبح فيما بعد الرابطة بين المندلية وبين البيولوجيا الجزيئية .

الارتباط هو اتجاه مجاميع الصفات لأن تنتقل سويا عبر الأجيال . وهو ليس شيئاً مطلقاً . فقد يكون التلازم بين الجينات قوياً أثناء انتقالها عبر الأجيال ، وقد لا تفضل الجينات كثيراً أن تظل بصحبة بعضها بعضاً . ولقد فسر عدم كمال الارتباط بوضع وقائع شاذة تحدث عند تكوين الحيوان المنوى والبويضة . تحمل كل خلية نسختين من كل كروموزوم . ينصف العدد أثناء انقسام خاص يحدث بخلايا الخصية والمبيض عند تكوين الخلايا الجنسية . في هذه العملية ترقد الكروموزومات سويا كل مع قرينه ، وتبادل أجزاء من بنيتها في عملية تسمى التآشب . وعلى هذا فإن الحيوان المنوى أو البويضة ، يحمل توليفات من المادة الكروموزومية تختلف عن تلك الموجودة في خلايا الأبوين .

اعتقد مورجان أن هذا قد يفسر السبب في أن هناك داخل المجموعة الارتباطية جينات تورث في تزاامل حميم ، بينما يورث غيرها في تلازم أقل حميمية . اقترح أن الجينين إذا وقعا على مقربة من بعضهما بعضاً على الكروموزوم ، قل احتمال افتراقهما عندما تتبادل الكروموزومات مادتها أثناء تكوين الحيوان المنوى أو البويضة . فإذا ما كانت ثمة مسافة بعيدة بينهما ، زاد احتمال انفصالهما . أما تلك الصفات التي تورث مستقلة فتقع على كروموزومات مختلفة .

وعملية التآشب هذه هي إعادة ترتيب إرث كل من الوالدين . فإذا ما تمت ، أصبح كل كروموزوم في الجيل التالي مزيجاً جديداً من المادة الوراثية مؤلفاً من قطع أعيد ترتيبها من زوج الكروموزومات المعنى .

استُخدم التأشير لرسم أول الخرائط الوراثية . كانت هذه تبين ترتيب الجينات ، ولاشئ أكثر ، تقريبا . تنظم الجينات فى تتابع ، ويمكن تحديد مواقعها عن طريق حساب مقدار التغير فى هذا التتابع بسبب التأشير فى كل جيل . اقترح مورجان أن الجينين اللذين يندر أن يفترقا أثناء التأشير لابد أن يكونا أقرب إلى بعضهما بعضا ، فإذا كان الجينان منفصلان كثيرا ، كان موقعاهما متباعدين . تمكن مورجان ، بدراسة الجينات اثنين اثنين أو ثلاثة ثلاثة ، من التوصل إلى ترتيبها على الكروموزومات ، وإلى البعد النسبى بينها . وبتجميع المعلومات عن مجموعات صغيرة من الصفات الوراثية أمكن رسم خريطة ارتباط لجينات الدروسوفيلا .

كان منهجه - خريطة تركز على الاستثناءات من المنذلية - منهاجا فعالا . استخدم فى البكتريا والطماطم والفئران وغيرها من الكائنات الحية . رسمت خرائط الآلاف من الجينات بهذه الطريقة . ولقد أمكن فى الدروسوفيلا ترتيب كل الجينات تقريبا على طول الكروموزومات .

ولما كان عمله يتطلب تجارب تربية ، فقد بقيت خريطة الارتباط البشرية بيضاء تقريبا . فعدد الأفراد فى معظم العائلات عادة ما يكون أقل من أن يسمح بالبحث عن الانحرافات من قواعد مندل . ونتيجة لذلك ، بدا أن ليس ثمة أمل كبير فى أن نستطيع يوما رسم الخريطة الوراثية للبشر .

أما الاستثناء الوحيد من هذه الأرض المجهولة فقد كان الارتباط بالجنس . فالواضح أنه إذا ما ارتبطت الجينات بكروموزوم س ، فلا بد أن تكون مرتبطة ببعضها بعضا . لم يستغرق الأمر طويلا لرسم خريطة الكثير من الجينات البشرية على الكروموزوم س . ومع ذلك فقد مضى رسم خريطة الارتباط بطيئا لدرجة مزعجة . حدد موقع جين عمى الألوان على الكروموزوم س مبكرا - فى عام ١٩١١ ، لكن لم يكتشف جين على أى كروموزوم آخر إلا عام ١٩٥٥ ، عندما ظهر أن جين مجاميع الدم أ ب ٥ يرتبط بشذوذ فى الهيكل العظمى . ثم حدد العدد الحقيقى

لكروموزومات الانسان فى العالم التالى . وقُرِن أول جين غير مرتبط بالجنس بالكروموزوم الذى يحمله فى عام ١٩٦٨ . لقد استغرق تحريك عملية رسم خريطة الارتباط فى الانسان زمنا طويلا ، ولا يزال الطريق أمامه طويلا .

تحول علم الوراثة عن طريق منهج للتفحص أقل براعة وأكثر فعالية ، منهج لا يعتمد على تجارب التربية ، وإنما يتضمن خريطة أكثر تقليدية ، خريطة فيزيقية توضح الترتيب الواقعى لكل القواعد على طول الدنا ، لا خريطة بيولوجية مبنية على أنماط الوراثة . ولقد غيرت الخريطة الجديدة فكرتنا عن ماهية الجينات .

قامت الثورة التقنية فى البيولوجيا الجزيئية - وفى زمن قصير حقا - بتوضيح ملامح الدنا وطريقة عمله بالتقريب . منذ ثلاثين عاما كان البيولوجيون الجزيطيون وقد ملأتهم الغطرسة . تصوروا أنهم قد حلوا كل مشاكل الوراثة ، ستؤدى المقدرة الجديدة على قراءة الدنا ، على وجه الخصوص ، المهمة التى فشلت دراسات العائلات فى إتمامها . ستعرفهم بمواقع الجينات وترتيبها جميعا . سيكتمل الصرح الذى أرسى مندل قواعده . كان للتفاؤل إذن ما يبرره . وكان من المقبول أن نفترض أن الخريطة الفيزيكية للجينات ستشبه كثيرا الخريطة البيولوجية المرتكزة على أنماط الوراثة ، وقد تحل محلها عندما يحين الوقت . اكتمل كبر البيولوجيين الجزيطيين بموهبة حب الدعاية للذات ، الموهبة التى لا بد وأن كان سينفر منها مؤسسو علم الوراثة .

فى طفولة علم وراثة الانسان ، منذ عشرين عاما ، كان للبيولوجيين نظرة صبيانية عن حقيقة العالم . كانت خريطة الارتباط - كمثال الخريطة الذهنية لطفل فى الحادية عشرة (أو لهيرودوت) - لا تحمل سوى عدد قليل من المعالم المألوفة ، كل فى الترتيب الصحيح بالنسبة لغيره . ولقد تغير هذا كله بالاستخدام المهرق - إن يكن موضوعيا - لمقياس البعد .

اعتمدت نجاحات المستكشفين الجزيئيين ، كمثل الجغرافيين من قبلهم - على أدوات جديدة للمسح جعلت من العالم مكانا أفسح وأكثر تعقيدا . أما الأدوات التي استخدمت في الجغرافيا الجزيئية فتستحق التنويه .

كانت الأداة الأولى هي التفريد الكهربى ، فصل الجزيئات فى مجال كهربى . فالكثير من المواد البيولوجية ، ومن بينها الدنا ، يحمل شحنة كهربية ، وإذا ما وضعت بين قطبين ، سالب وموجب ، فإنها تتحرك نحو واحد منهما أو الآخر . تستعمل مادة الجيل الغروية (وتعمل كالمنخل) فى تحسين عملية الفصل . كان الجيل يصنع فى أول الأمر من نشا البطاطس ، أما الجيل الحديث فيصنع من بوليمرات كيماوية . ولقد جربت جيل الفراولة ، ووجدته صالحا تماما . يفصل الجيل الجزيئات بناء على حجمها وشكلها : فالجزيئات الكبيرة تتحرك بشكل أبطأ أثناء مرورها خلال المنخل . هناك طرق عديدة يمكن بها تحسين العملية كأن يعكس التيار كل بضعة ثوان . هذا يعنى أن القطع الطويلة من الدنا يمكن أن تفرد كهربائيا ، إذ تلف وتبسط فى كل مرة يفتح فيها التيار .

يستطيع الكمبيوتر الذى أكتب عليه هذا الكتاب أن يقوم ببضع مهام لا لزوم لها ! فمن بين مواهبه مثلا أن فى مقدوره أن يفرز الجمل حسب طولها . سيصف هذه الجملة ، ذات الثمان عشرة كلمة ، مع الجمل زميلاتها من نفس الطول دون ثمة علاقة تربطها سويا . وهذا ما يفعله التفريد الكهربى مع الجزيئات . يمكن أن نقيس طول قطعة الدنا بتحديد المسافة التى تحركتها فى الجيل . ويمكن أن نحدد موقعها بالضوء فوق البنفسجى (الذى يمتصه الدنا) أو بالصبغات الكيماوية أو بواسم مشع . وستصطف كل قطعة مع زميلاتها من يحمل نفس العدد من حروف الدنا .

ثمة أداة أخرى لمسح الدنا تستعمل إنزيمات تُستخلص من البكتريا . تهاجم الفيروسات البكتريا . تولج الفيروسات نفسها فى دنا البكتريا وتجبرها على صناعة نسخ فيروسية جديدة . لكن للبكتريا وسيلتها للدفاع : إنزيمات تمزق الدنا الغريب .

وانزيمات التحديد هذه يمكن أن تستغل في تقطيع جينات الانسان إلى شرائح . هناك العشرات من هذه الانزيمات ، كل يقطع مجموعة بذاتها من حروف الدنا . أما طول قطع الدنا الناتجة فيتوقف على تكرار هذه المجموعة . فإذا قطعنا كل جملة في هذا الكتاب حيثما يظهر حرف إن فسنجد الآلاف من الشظايا الصغيرة ، فإذا كان الانزيم يتعرف على كلمة لكن فسينتج عدد أقل من شظايا أطول . أما إذا كان الانزيم يقطع عند كلمة موز الأقل تكرار (والتي تظهر لا شك بين الفينة والفينة) فلن نحصل إلا على عدد محدود من الشظايا ، كل طوله آلاف الكلمات.

توفر مواضع البتر (كمثال مواضع الكلمات : إن ، لكن ، موز) مجموعة من المعالم على طول الدنا . ومعرفة هذه المواضع هي أول خطوة نحو رسم خريطة فيزيقية للكتاب نفسه ، خطوة تعتمد على ترتيب الحروف والكلمات التي يضمها بين دفتيه . وهذه عملية تشبه تلك التي قام بها الطلبة عندما هاجموا السفارة الأمريكية في طهران بعد سقوط الشاه . فقد جمعوا سويا بمجهود جبار الوثائق السرية التي كانت قد فُرمّت ، وبتوفيق المُرَق مع بعضها بعضا استطاعوا أن يعيدوا تركيب رسالة طويلة معقدة كانت فضيحة !

تقوم البيولوجيا الجزيئية بنفس الشيء . ثمة وسائل مختلفة تسمح بإيلاج قطع الدنا المفصولة في دنا بكتيرية أو خميرة . تغدو هذه القطع عندئذ وقد كلونت . فكلما انقسمت البكتيرة كاثرت ليس فقط رسالتها الوراثية وإنما أيضا الجين الغريب الذي أولج بها . ونتيجة لذلك يمكن انتاج ملايين النسخ من قطعة الدنا المولجة ، لتُدرس إلى التفاصيل الدقيقة المطلوبة للجغرافيا الوراثية .

كانت الكلونة أساسية لنخطو الخطوات الأولى نحو الخريطة الفيزيقية . ولقد استُبدلت بها وسيلة أخرى : تفاعل البوليميريز المتسلسل (ت ب م) . وهذا يستعمل إنزيمًا يستخدم في النسخ الطبيعي للدنا بالمعمل ، لصناعة مكررات من

الجزء . فإذا مضينا في استخدام التشبيه الأدبي المرهق فإن ت ب م هو آلة بيولوجية لتصوير المستندات يمكنها أن تنتج كل ما نحتاج من صور لأية صفحة من الكتيب الوراثي . يؤخذ إنزيم النسخ من بكتريا تحيا بالينابيع الحارة ، ولا تتأثر بالتالي بدرجات الحرارة العالية . وتسخين وتبريد مزيج التفاعل وتغذيته بالقواعد الأربع ، يمكن صناعة ملايين النسخ من قطعة الدنا الأصلية .

ثمة طريقة أخرى تخدم راسمي الخرائط ، طريقة تستغل قدرة الدنا على الارتباط بالنسخة المكتملة له . تشكل قواعد الدنا اثنين من الأزواج المتكاملة أ مع ث ، ج مع س . لكي نعثر على جين ، يمكننا أن نصنع بالمعمل النسخة المكتملة لدناه . فإذا أضيفت هذه النسخة إلى خلية ، قامت بالبحث عن نظيرتها على الكروموزم . وارتبطت بها ، لنعرف موقع الجين على الخريطة . والكمبيوتر الذي أكتب عليه يقوم بنفس الشيء . بأمر بسيط واحد ، تجده ينطلق ليبحث عن أى كلمة أختارها فيبرزها في لون أرجواني ساحر ، وتزداد أهميته إذا كان يبحث عن كلمة نادرة (مثل كلمة موز) . فإذا ما وسم مسير الدنا بصبغة لاصقة ، فمن الممكن أن نكشف الجينات بنفس الشكل . تسمى هذه الطريقة باسم طريقة التهجين للصفى (للجينات) في الموقع .

كل هذا قد نُور عملية رسم خرائط دنا الانسان . حسنت أولاً من خريطة الارتباط . في مقدورنا أن نتتبع أنماط وراثة تتابعات قصيرة من الدنا خلال الأجيال ، تماماً مثلما نتتبع عمى الألوان أو قصر الاصابع . وبين الأفراد ملايين المواقع التي تختلف من شخص إلى آخر ، ومن الممكن استغلالها في دراسة الأسلاف . ولما كانت معظم العائلات اليوم قليلة العدد ، فثمة تعاون يجرى مع المورمون بالولايات المتحدة ومع البنجلاديشيين ببريطانيا ، فلدى هؤلاء من الأبناء ما يكفي لرسم شجرة النسب . وهناك مشروع رائع يستخدم فيه تفاعل البوليميريز المتسلسل في اكثار نسخ الدنا من حيوان منوى واحد : ترسم خريطة الارتباط بمقارنة الكروموزومات المؤشبة

للحيوان المنوى بكروموزومات الرجل الذى أنتجه ، لنجتاز بذلك عقبة حجم العائلة كلية .

ومهمة رسم خرائط الارتباط للانسان لا تزال مهمة شاقة . لقد طالما رغب البيولوجيون فى أن يرسموا نوعاً جديداً من الخرائط ، نوعاً كذلك الذى يستخدمه الجغرافيون ، لا يركز على التأشيب وإنما على وصف فيزيقى مستقيم للمادة الوراثية . والخريطة المرجوة تبين ترتيب كل من الثلاثة آلاف مليون من حروف الدنا. المهمة هائلة : أن نهاجم الطاقم الوراثى بكل ما نملك من مال ووقت وجهد إلى أن نقرأه كله من أوله إلى آخره . ولقد أحرز بالفعل تقدم كبير . وربما كان لحربنا الخاطفة أن تنتهى بنهاية هذا القرن .

أما الخطوة الأولى فى ربط خريطة الارتباط بأخرى تعتمد على البيولوجيا الجزيئية فقد جاءت بمحض صدفة حسنة . لاحظ مورجان أن جينا معيناً يرتبط عادة بالجنس قد فعل شيئاً غريباً فى إحدى الذبابات : لقد بدأ يسلك كما لو كان على كروموزوم آخر غير س . وبالفحص الميكروسكوبى أمكن معرفة ما حدث . لقد التصق كروموزوم س بكروموزوم آخر ليورث معه . وكان التغير فى تلازمات ارتباط الجين يرجع إلى تغير موقعه الفيزيقي .

استغلت مثل هذه المصادفات الكروموزومية كخطوة أولى نحو رسم خريطة البشر الفيزيكية ، إذ يحدث ما بين الحين والآخر خطأ أثناء تكوين الحيوان المنوى أو البويضة، فينتقل جزء من أحد الكروموزومات إلى مقر جديد . يصطحب ذلك تغير فى نمط وراثه جين يستخدم كمفتاح إلى مكان وجوده .

تغيب أحيانا قطعة بالغة الصغر من أحد الكروموزومات . وكل من يحمل مثل هذا الكروموزوم المقتضب قد يعانى من بضعة أمراض وراثية فى نفس الوقت . ثمة

صبي أمريكي تعيس أصيب بنقص في الجهاز المناعي وعمى وراثي وحثل عضلى . واتضح أن كروموزوم س فيه تنقصه قطعة غاية في الصغر ، لابد أن كانت تحمل الدنا الخاص بجينات هذه الصفات . قدم هذا الصبي الأمريكي أول الاشارات الهامة عن موقع جين الحثل العضلى - وهذا واحد من أكثر الأمراض الوراثية انتشارا وخطرا . كانت القطعة الناقصة معلما يمكن أن تركز عليه خريطة فيزيقية للمنطقة المحيطة بهذا الجين .

عند رسم خرائط الجينات بتفحص التغيرات الكروموزومية ، لا يلزم أن نتظر وقوع مثل هذه الحوادث البيولوجية الطبيعية . من الممكن أن تزرع الخلايا البشرية فى المعمل . ويمكن أيضا أن نزرع خلايا الفأر وخلايا الهامستر . فإذا نمينا خلايا إنسان مع خلايا فأر ، فقد تندمج الخلايا لتعطى هجنا تحمل كروموزومات النوعين سويا . وعندما تنقسم هذه الخلايا الهجينة ، فإنها تفقد كروموزومات (وما تحمله من جينات) من هذا النوع أو ذاك . وفى كل مرة يختفى فيها كروموزوم بشرى تختفى أيضا جينات بشرية - لابد أن تكون مواقعها على هذه الكروموزومات . ولقد أمكن فى بعض الحالات أن تربط جينات باستخدام الشظايا الكروموزومية القصيرة التى تحملها .

ولقد حدد الموقع التقريبي على الكروموزومات للغالبية العظمى من الأمراض الوراثية الشائعة . أما تحديد الموقع المضبوط لكل منها فيحتاج إلى زمر جديدة من نظم رسم الخرائط الدقيقة . وتقنيات تحديد التابع البليدة - كما تسمى - تقنيات بسيطة . إحداها تعتمد على قدرة الدنا على نسخ نفسه إذا وفرنا إنزيما معيناً وزودنا المزيج بالقواعد الأربع : أ ، ج ، س ، ث . يتضمن التفاعل نمو نسخ من قطع جديدة دنا تزداد طولاً من طرف إلى الآخر . يبدأ العمل بأربع تجارب منفصلة (كل يستخدم قاعدة مختلفة من القواعد الأربع) فى نفس الوقت ، وكلها تنطلق من نفس المكان بالدنا . ببعض الحيل الكيماوية توقف بعض الجدائل كل مرة تضاف

فيها قاعدة . هذا ينتج قطعاً من الدنا ذات أطوال مختلفة، كل منها توقّف عند قاعدة: أ ، أو ج ، أو س ، أو ث . فإذا أجرينا التفريد الكهربى على نفس الجيل لكل مزيج لدينا فستظهر أربعة خطوط متوازية من شظايا الدنا مرتبة فى أطوال متزايدة . وإذا ما قرأنا عبر الجيل وإلى أسفل توصلنا إلى ترتيب القواعد .

هذا عمل مجهد للغاية ، ولن يطمع المعمل الواحد فى انجاز أكثر من جزء ضئيل غاية فى الضآلة من المهمة كلها ، رسم مقطع صغير حول الجين الذى نبحث عنه . وهذه الخرائط الاقليمية - خرائط المدن - لابد أن تجمع سوياً فى ترتيبها المضبوط قبل أن نركّب منها خرائط أكبر للدنا . ثمة طريقة تصنع فيها سلسلة من التتابعات المتراكبة لقطع صغيرة من الدنا . وهذا قد يشبه تجميع صفحات ممزقة لدليل شوارع مدينة عن طريق النظر إلى التراكبات عند حواف الصفحات لمحاولة العثور على الشوارع التى تجرى عبرها .

تتطلب هذه الطريقة قدراً من أعمال الكمبيوتر السحرية . لكن هناك بعض الطرق المختصرة . من بينها أن نقفز بضع صفحات فى دليل شوارع المدينة على أمل أن نتجنب بعض المناطق المزعجة فى الجوار . الموضوع كله تكرارى للغاية ، حتى لقد اقترح بعضهم - ليس تماماً على سبيل الدعابة - أن يحكّم على من تثبت إدانته بتزوير النتائج ، بعقوبة تحديد تتابع ألف قاعدة دنا ، أو عشرة آلاف ، أو مائة ألف !

ربما كان أفضل تشبيه لطريقة الهجوم على الخريطة الجزيئية هو مسح أراضى دولة باستخدام مسطرة قصيرة ، بدءاً من طرف ، ثم المضى فى عناد حتى الحدود المقابلة . يلزم أن تتزايد السرعة إذا كان للمهمة أن تتم . وتبقى الحقيقة الموجهة : إن الجزء الأكبر من الثلاثة آلاف مليون قاعدة لا يزال ينتظر التحديد على الخريطة . لكن التكنولوجيا قد بدأت تسعفنا . عندما بدأت المهمة منذ خمسة عشر عاماً ، كانت حصيلة عمل الفرد فى العام هى خمسة آلاف قاعدة دنا . أما الآن فقد غداً أمراً روتينياً أن ينجز الفرد عشرين ضعف هذا العدد . لقد رسمت بالفعل زمرة من

خطط ضخمة متراكبة لاثنين من أصغر كروموزومات الانسان وذلك بإيلاج مقاطع منهما في خلايا الخميرة (وهذه تقنية يمكن أن تعالج مقاطع طويلة من الدنا) . غطى حتى الآن أكثر من تسعة أعشار الطاقم الوراثي كله في خريطة ارتباط حدد فيها الترتيب والموضع النسبي لمقطع قصير متكرر من الدنا . ولقد تظهر طرق جديدة تسرع من العملية . ولقد يصبح من الممكن قريباً ترتيب القواعد بميكروسكوب إلكتروني على القوة يتفحص الكروموزوم ، بطريقة بريل جزئية .

أما رسم خريطة الطاقم الوراثي كله فتستغرق زمناً طويلاً - بل ويرى البعض أن الأمر لا يستحق هذا العناء . فالمستكشف على أية حال إذا ما غزا أرضاً جديدة لا يبدأ برسم خريطة لأول قرية يدخلها ثم يوسعها في تفاصيل مفرطة إلى أن يكشف القطر كله ، وإنما هو يختار المعالم الرئيسية ويترك الخريطة المفصلة إلى وقت لاحق عندما يعرف المناطق الأخطر شأنًا . وقد يكون من الأفضل أن نركز على المقاطع الأكثر أهمية : الجينات التي تنتج البروتين بالفعل .

وهناك من أنواع البروتينات ما قد يصل إلى ٥٠ - ١٠٠ ألف نوع . يعطّل انتاج هذه البروتينات في معظم الخلايا ، لكن هناك في خلايا المخ ثلاثين ألفاً منها تعمل في أى وقت . وهذا عدد يفوق بكثير ما يوجد بأى من الأنسجة الأخرى ، وهو قد يفسر السبب في أن ما يزيد على ربع الأمراض الوراثية جميعاً يؤدي إلى مرض عقلي . عندما يقوم الجين بصناعة شيء ، فإنه يولد رنا مراسلاً (وهذا جزئياً مكمل ينقل المعلومات الوراثية من الدنا إلى الجزء الأساسى من الخلية) . فإذا لم يكن يعمل فإنه لا ينتج أى رنا . وعلى هذا فإن استخلاص الرنا المرسال يعتبر وسيلة ممتازة للبحث عن الجينات العاملة . تمضى الآن هذه المهمة بنجاح ، وبها أمكن العثور على ثلاثة آلاف جين جديد بالمخ . أما وظيفة أى منها فلا يزال أمراً مجهولاً .

ربما رسمنا الخريطة الكاملة في نهاية الأمر ، فهذا على أية حال أمر يستحق ، لأننا ببساطة لا نعرف ما قد تكشف عنه . وإتمامها يتضمن إعادة تأكيد حقيقة من

أهم الحقائق التى يساء فهمها فى العلم : وهى أنه من الممكن عادة حل المشكلة إذا أغدقنا عليها المال .

أصبح واضحا بالفعل أن الخريطة الفيزيائية لا تشبه كثيرا خرائط الارتباط التى ظهرت عن دراسات العائلات . تكمن الصعوبة الرئيسية فى مشكلة المقياس . هناك ما قد يصل إلى مائة ألف جين عامل فى الإنسان ، لكن هناك ثلاثة آلاف مليون حرف . ولما كانت الغالبية العظمى من الجينات تستخدم فى إنتاج بروتيناتها معلومات مشفرة فى بضعة آلاف قاعدة فقط ، فإن هناك على ما يبدو قدرا من الدنا أكثر من المطلوب . يبين رسم الخرائط الفيزيائية أن الجزء من الدنا العامل بالجينات يبلغ نحو ٥ ٪ من مجموع القواعد . للطاغم الوراثة البشرى بنية غير عادية ، تقصر خرائط الارتباط عن بلوغ خصائصها العجيبة .

يمكننا أن نصل إلى فكرة عن الخريطة الفيزيائية بإجراء مقارنة بخريطة جغرافية . تخيل أن الرحلة على طول دنك كلة تعادل رحلة من لاندز إند إلى جون أوجروتس عبر لندن . هذه مسافة يبلغ طولها ألف ميل (أى أنها تعادل بالتقريب المسافة من نيويورك إلى شيكاغو) . ولكى نوفق كل حروف الدنا فى خريطة لطريق بهذا الطول ، علينا أن نضع بكل بوصة من الطريق خمسين قاعدة دنا ، أى ثلاثة ملايين قاعدة بكل ميل . تمر الرحلة عبر ٢٣ مقاطعة مختلفة الأحجام . وهذه التقسيمات الإدارية تعادل ، بالصدفة الحسنة ، عدد الكروموزومات التى يعبأ بها الدنا البشرى . يبلغ قدر الدنا الذى تم تحديد تنابعاته حتى الآن طول المسافة من لاندز إند إلى بينزانس ، على مبعده بضعة أميال - أى ، فى الخريطة الأمريكية ، طول جزيرة مانهاتن . ما زال الطريق أمامنا طويلا .

والمشهد على طول الرحلة معظمها ممل للغاية ، يبدو - كمثل بريطانيا المعاصرة - قاحلا تماما . تغطى نحو ثلث المسافة مكررات من نفس الرسالة . ثمة نحو خمسين ميلا تمتلىء بكلمات من خمسة أو ستة أحرف ، أو أكثر ، تتكرر

متلاصقة بلا نهاية . والكثير منها كلمات تقرأ طردا وعكسا (مثل البيت : مودته تدوم لكل هول . ∴ وهل كل مودته تدوم ، الذى يقرأ من بدايته إلى نهايته مثلما يقرأ من النهاية إلى البداية) . والبعض من هذه المكررات المترادفة مبثـر فى مجاميع على طول الطاقم الوراثى . يختلف موقع وطول كل مجموعة من شخص إلى آخر . والبصمات الوراثية الشهيرة (التوقيع الموروث المتفرد الذى يستخدم فى ساحات القضاء) تعتمد على عدد و مواقع هذه المكررات المترادفة . ولتحديد البصمة الوراثية يستخدم إنزيم يتر مقطعا مكررا معينا . وهذا يشرح الدنا إلى العشرات من الشظايا . وهناك تتابعات مكررة لا تحمل إلا حرفين فقط - س ، أ - مضاعفة آلاف المرات . لكن الكثير من الطاقم الوراثى مكرس لرسائل عرضية طويلة تبدو وكأنها لا تقول شيئا .

خطر حقا أن نهمل كل هذا الدنا ونعتبره عبثا ، لا لسبب إلا أننا لا نفهم ما يقوله . للمصطلح الصينى شى ثلاثة وسبعون معنى مختلفا - حسب طريقة نطقه . من الممكن أن نصوغ جملة مثل السيد مغرم بلعق لعاب الأسد بأن نكرر كلمة شى وحدها مرة بعد مرة ، وقد يبدو هذا تكرارا لا معنى له لدى معظمنا ممن لا يفهمون الصينية .

تمتلىء مساحة كبيرة من المنظر الطبيعى الوراثى بجثث جينات مهجورة ، وقد تتكرر نفس الجثة مرات ومرات . وتتابعات دنا هذه الجينات الكاذبة تشبه تتابعات أقاربها العاملة ، سوى أنها قد فسدت ولم تعد تنتج شيئا . لقد دمر جزء حيوى من آليتها فى وقت ما من تاريخها . ومن ذلك التاريخ أخذ الوهن يزحف عليها فى هدوء . أما المدهش حقا فهو أننا قد نعثر على نفس الجينات الكاذبة فى مواقع عديدة على طول الرحلة .

بعد أميال طويلة من أدغال مقفرة من الدنا المتكرر ، سنصل إلى مناطق خصبة مشمرة . تلك هى الجينات العاملة . ثمة مفاجآت فى بنيتها تنتظرنا . يمكن التعرف

على الجين العامل من ترتيب الحروف فى أبجدية دناه ، التى تقرأ فى كلمات من أحرف ثلاثة مكتوبة فى الشفرة الوراثية تدل على أن فى مقدوره أن ينتج بروتينا ما . والعادة ألا نجد إلا القليل مما يدلنا عما يفعله البروتين حقا ، بالرغم من إمكان استنتاج تركيبه (وتخمين صورته) عن طريق ترتيب حروف الدنا التى تكونه .

ينظم الكثير من الجينات فى مجاميع تصنع منتجات ذات قرابة . وهناك بالطاقم الوراثى ما يقرب من ألف من عائلات الجينات هذه . ونحن نعرف عن عائلة معينة تختص بصناعة صبغة الدم الحمراء أكثر مما نعرف عن غيرها . فى خلايا النخاع ، التى تنتج كرات الدم الحمراء ، يعمل كل الدنا تقريبا . لكننا نعرف أكثر عن مجموعة صغيرة من الجينات محمومة النشاط . يتركز الكثير من بيولوجيا الانسان الجزيئية على هذا المركز الوراثى الصناعى بالذات : جينات البيتا - جلوبيين .

وهى تقع فى نحو منتصف الطول الكلى للدنا ، فى منتصف المسافة إلى جون أوجروتس - فى ليدز تقريبا . هى تصنع بعض البروتينات الخاصة بنقل الاكسجين . تحتوى مدينة الجلوبيين الصناعية على نحو ستة مقاطع دنا تنتج منتجات ذات صلة . فأما الجزء المختص بصناعة صبغة الدم الحمراء فهو صغير جدا : طوله نحو ثلاثة أقدام بمقياس رسم الخريطة . وعلى بعد بضعة أقدام هناك جزء آخر يصنع جلوبيينا لا يوجد إلا بالجنين . وعلى مقربة من هذا الأخير سنجد الهياكل الصدفية لمعدات توقفت عن العمل منذ سنين . يغطى مصنع الجلوبيين كله نحو مائة قدم ، معظمها مسافات شاغرة بين الجينات العاملة ، وهو يتعاون مع مصنع أخر له نفس الحجم يقع بعيدا (قرب لندن على الخريطة الخيالية) ينتج بروتينا ذا قرابة . والمنتجان سويا يصنعان صبغة الدم الحمراء . تنظم معظم الجينات العاملة فى عائلات ، قرية من بعضها أو مبعثرة عبر الطاقم الوراثى بأكمله .

هناك سمة أخرى تثير الدهشة فى خريطتنا ، هى أن أطوال الجينات تتباين كثيرا : من نحو خمسمائة قاعدة إلى أكثر من مليونين . تتخلل كل المقاطع العاملة - كلها

تقريبا - أطوال من دنا غير مشفر ، وسنجد أن الغالبية العظمى من الجينات الكبيرة (كذلك الجين المعطوب الذى يسبب الحثل العضلى) لا تشفر شيئا. يشترك الدنا غير المشفر في المرحلة الأولى من عملية الانتاج ، لكن هذا المقطع من الرسالة الوراثية يقتضب من الرنا المرسال قبل تجميع البروتين . قد يبدو هذا طريقة شاذة لقضاء الأمور ، لكنه الطريقة التى انتهى إليها التطور .

لاشك أن هناك الكثير من المفاجآت فى انتظارنا مع تقدم المساحين بطيئا فى طريقهم نحو جون أوجروتس . ولقد يتضح أن ستتغير صورة العلاقة بين خريطة الارتباط والخريطة الفيزيقية . أحرز جغرافيو الجينات بعض النجاحات ، ربما كان أهم ما فيها يتعلق بالمفاهيم . فلما كنا نعرف شفرة الحروف الثلاثة لكل حمض أمينى ، فمن الممكن أن نستنبط ترتيب الأحماض الأمينية التى تنتجها أى قطعة عاملة من الدنا عن طريق النظر إلى تتابع القواعد بها . أما ما يصنعه بالفعل أى جين نكتشفه فمن الممكن تخمينه بمقارنة هذا التتابع بمعلومات عن تتابعات نعرف وظيفتها مخزنة بالكمبيوتر . وهذه العملية تشبه إلى حد ما قراءة لغة أجنبية باللجوء إلى قاموس يعرفنا بمعناها .

هناك تشابهات مفزعة بين المعاجم الوراثية لكائنات جد متباعدة . فالإنسان يحمل جينات تكاد تكون مطابقة للجينات التى تتحكم فى تنامى ذبابة الفاكهة ، الأمر الذى قد يشير إلى أننا نشترك معها فى نفس العمليات الأساسية . والجينات التى تصنع مخ ذبابة الفاكهة قريبة بشكل يخجلنا من تلك التى تصنع مخاخنا . ثمة مقارنات أخرى قد تثيرنا بنفس القدر . فبعض الجينات التى تسبب عند فسادها مرض السرطان تشبه كثيرا تلك التى تشفر للهرمونات . بل إن واحدا من جيناتنا - يا للعجب - يكاد يكون مطابقا لآخر لا نعرف من وظائفه إلا أنه يحور من نمط العروق فى جناح الحشرة . إن عملية ترجمة لغة بيولوجية إلى أخرى عن طريق مراجعة الكلمات بالكمبيوتر ، قد مضت إلى مدى بعيد ، حتى لنجد لدينا احتمالا

يبلغ ٥٠ ٪ فى أن ينتسب أى تتابع دنا جديد نكتشفه إلى شىء آخر : إما جين آدمى آخر ، أو جين من أحد الكائنات البعيدة جدا عنا فى عالم الأحياء .

ولقد حوّل هذا علم وراثة الانسان . فبدلاً من أن نبدأ من تغير وراثى (مرض وراثى مثلاً) لنكدّ نبحت عن موقعه ، فإننا نستخدم الاستراتيجية المضادة : تحديد موقع الجين ، ثم تحديد وظيفته - إذا حالقنا الحظ - وذلك من قراءة تتابعه الدناوى . علم الوراثة هو أول علم يتقدم بالسير فى الطريق المضاد . وسنكشف معظم الجينات البشرية باستخدام منطق هو بالضبط عكس منطق مندل : من الجسيم الوراثة إلى الوظيفة ، لا من الوظيفة إلى الجسيم .

كان أول اختراق لهذا المنهج الجديد - وربما الأهم - هو اكتشاف جين التليف الكيسى عام ١٩٩٠ . تكلفت المهمة ١٥٠ مليون دولار ، لكن ما أحرز من تقدم فى التكنولوجيا يعنى أن تكاليف اكتشاف غيره من الجينات ستكون أقل . التليف الكيسى هو أكثر الأمراض الوراثية انتشاراً بين البيض من البشر ، فهو يصيب فى أوروبا طفلاً من بين كل ٢٥٠٠ . وأعراضه تبدو للوهلة الأولى وكأن لا علاقة بينها ، لكنها جميعاً تنجم عن عجز الجسم عن ضخ الملح عبر الأغشية التى تغلف الخلايا . كان حاملو المرض من الأطفال ، وحتى عهد قريب ، يموتون فى سن مبكرة . تمتلئ الرئة بالمادة المخاطية ، وتصيبهم الأمراض البكتيرية ، فتغذيتهم دائماً ما تكون فقيرة لأنهم لا يفرزون ما يكفى من إنزيمات الهضم . ولقد حسن الطب من حياة مرضى التليف الكيسى ، لكن من النادر أن يعيش أى منهم إلى سن تزيد على ٣٥ عاماً .

بينت دراسات العائلات من زمان طويل أن المرض يرجع إلى جين متنح لا يقع على كروموزوم الجنس . فى عام ١٩٨٥ أوضح تحليل الأسلاف أنه مرتبط بتتابع دناوى آخر يتحكم فى إنزيم كبدى ، وإن لم يعرف عندئذ موقعه . وفى خلال عام أو نحوه بينت إحدى العائلات أن هذا الزوج من الجينات يرتبط بطفرة دناوية كان موقعها قد حدد على الكروموزوم السابع . أولجت قطعة الكروموزوم التى تحمل جين

التليف الكيسي - مع جينات أخرى كثيرة غيره - فى خط خلايا فأر . بُترت إلى قطع صغيرة وبدأت المهمة العسيرة لتحديد التتابعات . وبحلول عام ١٩٨٨ كانت المنطقة الحرجة وقد حددت فى مقطع من الدنا طوله مليون ونصف مليون قاعدة . اختبرت الشظايا لمعرفة ما إذا كانت تحمل تتابعات شائعة مع دنا كائنات أخرى ، كالقُفْران . فإذا كانت تحمل مثل هذه التتابعات فسيفترض أن ترتيب الحروف قد استبقى عبر التطور لأنه ينتج شيئا مفيدا . عشر على مقاطع عديدة مشتركة . كان لأحدها حروف دنا مماثلة لحروف بروتينات أخرى تختص بالنقل عبر الأغشية . وكانت هذه القطعة من الطاقم الوراثي تتبع بالضبط نفس نمط وراثه التليف الكيسي . لقد عثرنا على الجين !

ومثلما هو الحال فى رسم خريطة العالم ، فإن العثور على الجين كان هو الخطوة الأولى فى تفهم ما يجرى فى الجوار . مكنتنا ترتيب حروف الدنا من تخمين شكل البروتين المعيب . صحيح أن طول الجين نفسه يبلغ ربع مليون قاعدة دنا ، إلا أن الناتج عنه لا يحمل إلا ١٥٠٠ حمض أميني . بينت نماذج الكمبيوتر عن صورته أنه يمتد فوق غشاء الخلية بضع مرات ، وأنه قد يعمل كمضخة .

بالكثير من العائلات المصابة بالتليف الكيسي تغير واحد فى البروتين ، لا أكثر: ثمة حمض أميني واحد ناقص ، فى ثلث الطريق على طول الدنا ، وهذا يوفر اختبارا مباشرا لما إذا كان الاشخاص الطبيعيون يحملون نسخة واحدة من الجين دون أن يعرفوا ، أو - وهو الأهم - ما إذا كان الجين يحمل نسختين . لكن الخريطة الجزيئية قد بينت للأسف أن التليف الكيسي ، الذى بدا يوما وكأنه مرض بسيط ، قد ينشأ عن أكثر من مائتى تغير فى الدنا . وعلى ذلك فإن استخدام الخريطة الوراثية لمعرفة المهددين بخطر المرض لن تكون مهمة سهلة كما كنا نأمل .

ولقد أمكن تعقب عدد من الأمراض الوراثية ، ولا يزال البعض الآخر مستعصيا . يؤدى مرض هنتنجنون إلى انحلال الجهاز العصبى والموت فى بداية الكهولة . وقد كان يسمى مرض رقص هنتنجنون بسبب الحركات اللاإرادية المترنحة التى يقوم بها

المصابون . ثم إنه مرض مزعج أيضا لأن من هم في خطر أن يرثوا الجين يظلون لسنين طويلة - بسبب تأخر ظهور الأعراض - في شك فيما قد يكون المصير . في عام ١٩٨٣ حدث اختراق ساعد في تسهيل مهمة راسمى الخرائط - كانت ضربة حظ رائعة . فبعد بداية البحث بوقت قصير حقا أمكن معرفة الموقع التقريبي لجين هنتنجتون عن طريق تعقب علاقته بطفرة في الدنا مرتبطة به تقع على نفس الكروموزوم . لكن الحظ تخلى عنهم بعد ذلك ، وبعد عشر سنين أمكن تحديد الموقع : يكاد يكون من المؤكد أنه يقع بطرف الكروموزوم الرابع . فإذا ما رسمنا خريطة الجين وتم تحديد تتابعاته فقد يمكننا أن نعرف أين يقع الخطأ في الخلايا العصبية . إن هذا لا يزال لغزا .

لقد غدا رسم الخريطة الفيزيائية الآن قضية عرق يُذَلَّ لا قضية إلهام ووحى . يتقدم المنهج الصناعى الآن بخطى سريعة . ثمة من يدعى هنرى فورد - من بين البيولوجيين الجزيئيين - يقدر أن الأتمتة ستضاعف سرعة رسم الخرائط مائة مرة ، وتقلل التكاليف بنفس النسبة . ولقد اتخذ الفرنسيون في مشروعهم (الجينثون) منهجا عقلانيا جدا : مصنعا لعلم وراثية الانسان تعاونه نداءات تلفزيونية . وكل هذا يعنى أنه من المحتمل أن تكتمل الخريطة الفيزيائية على نهاية هذا القرن - موعد مناسب !

ثمة مشروع لوضع الموضوع تحت اشراف تنظيم مركزى - مشروع الطاقم الوراثى البشرى . يرى المتحمسون للمشروع أنه تنفيذا لوصية الانجيل : اعرف نفسك . هم يبحثون دائما عن صورة مكررة مبتذلة ، عندما يجدون في تحديد التتابعات الكأس المقدسة التى شرب منها المسيح والتى لا يزال المسيحيون يجدون فى البحث عنها . وكانت أهم النتائج حتى الآن تسلية بريئة سعد بها النظارة . لا يزال الصراع الوحشى قائما بين من يصر على أن يجعل دافعى الضرائب الأمريكيين (والبريطانيين لحد ضئيل) يلعبون دور فرديناند وإيزابيلا المعارض لطموحات راسمى الخرائط الأمريكيين ، وبين من لديهم نفس الحماس لإيقافهم .

يتهم المعارضون هذا المشروع بأنه خدعة دعائية تقوم بها مجموعة حولت الاعتماد المالى لصالحها بعيدا عن آخرين يقومون بأعمال أكثر ابداعا . فالواقع أن ميزانية البحوث الأساسية للمعاهد القومية للصحة بأمريكا قد انخفضت ، فى الوقت الذى ضوعفت فيه ميزانية خريطة الجينات البشرية خمس مرات . بدأت بيولوجيا المحسوبة فى الظهور ، إذ يتنافس السيناتورون لتوجيه العمل نحو ولايتهم . هناك ستالينية جديدة فى السياسة العلمية ! لقد تمكن من يمتلكون أذن السياسى وغرور العالم من تحويل ميزانية متضائلة إلى برامج ومعاهد ومراكز ، ليضخوا الحياة فيما هو مأمول على حساب ما هو فجائى غير متوقع . أما المعارضون فقد أبعدوا ، إن لم يكن إلى منفى حقيقى ، فإلى منفى عقلى على الأقل . لقد هجرت السوق الحرة للعلم لصالح الاقتصاد الموجه - وهذا شئ غريب ، لأن من يتولون أمر المال هم من أنصار السوق الحرة فى كل مجال آخر .

دافع راسمو الخرائط بأن أبرزوا ما سنجنيه من فوائد . إن الربح الاقتصادى واضح بالفعل فى ذلك السباق المحموم نحو تسجيل منتجات الجينات حال اكتشافها . ستجلب البراءات الثروة لمن يعثر على علاجات الأمراض الوراثية ، أو حتى اختبارات لها . ثمة أموال كثيرة يجرى الآن تبادلها . بيعت حقوق تفاعل البوليميريز المتسلسل بمبلغ ٣٠٠ مليون دولار . هناك واحد من مناصرى مشروع الطاقم الوراثى البشرى ، كان صريحا جدا . قال إنه بالرغم من موافقته على أن الأجدى هو مسح دنا الفئران لا الرجال ، إلا أن الطاقم البشرى متفرد ، فهو ينتمى إلى الجنس الوحيد المستعد لدفع الفاتورة ! إن تكاليف المشروع أقل من تكاليف السباق للهبوط على القمر ، الذى كانت تركته بعد خمسة وعشرين عاما هى فى الواقع : ثم ماذا ؟ ! . وعلى عكس رحلة القمر ، فإن انجاز أى جزء من الطريق على طول الدنا يعتبر فى حد ذاته شيئا عظيما .

إذا نظرت إلى خريطة قديمة - حتى لو كان بها من الأخطاء مثل ما بخريطة هيروودوت - فستدرك أن الخرائط تحمل بداخلها قدرا كبيرا من حياة راسمها . هى تبين حجم ومواقع المدن ، مسالك هجرة البشر ، وسجلا عن شعوب اختفت من

زمان طويل مضى . وليست الخريطة الوراثية البشرية استثناء ، ولقد تحوى بين طياتها سر الكثير من الأمراض التى تصيبنا . وعندما يتخرج طالب الطب الذى يسجل اليوم فى كليته ، ثم يبدأ فى ممارسة مهنته - وهى مهنة يلعب علم الوراثة فيها دورا حاسماً - فلا بد أن تكون من بين يديه نسخة من الخريطة الكاملة .