إيفار إيكلاند

السَّديم

مكتبة ٥٧٤

ترجمة

د. عزالدين الخطابي

إيفار إيكلاند

السَّديم

مكتبة | 574

ترجمة

د. عزالدين الخطابي

مراجعة

د. فريد الزاهي

بيانات الفهرسة أثناء النشر

Q172.5 C45 E4412 2016

Ekeland, Ivar, 1944-

[Le Chaos]

السَّديم / تأليف إيفار إيكلاند ؛ ترجمة عز الدين الخطابي ؛ مراجعة فريد الزاهي. ـ ط. 1. ـ أبو ظبي : هيئة أبو ظبي للسياحة والثقافة، كلمة، 2016.

ص. 152 ؛ 10,5 × 18 سم.

ترجمة كتاب: Le Chaos

تدمك 978-9948-17-553-7

1ـ السَّديم. 2– الفيزياء– نظريّات.

أ– خطابي، عز الدين. ب– زاهي، فريد. ج– العنوان.

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الفرنسي:

Ivar Ekeland

Le Chaos

كلمة

KALIMA

www.kalima.ae

ص.ب: 2380 أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة، هاتف: 300 6215 2 971+

فاكس: 127 6433 2 971+

هيئة أبوظبي للسياحة والثقافة

ABU DHABI TOURISM & CULTURE AUTHORITY

المحتويات

تقديم

بحي باريسي لا منفذ له يحمل اسم بيرطو Berthaud، غير بعيد عن مركز جورج بومبيدو Pompidou المتميز بشبكة أنابيبه البراقة، كان هناك متحف خاص بالآلات الموسيقية الميكانيكية، وهو المتحف الذي لم يعد له أثر اليوم. وكان يحتوي على أشياء مذهلة نذكر منها، العلب الموسيقية وآلات الحاكي القديمة وآلات الأرغن الصغيرة المتنقلة وآلات البيانو الميكانيكية وآلات ذاتية الحركة، على شكل إنسان آلي مجهز وينفخ في المزمار. كان هناك أيضاً بيانو كبير الحجم، يمكّن جهازه الآلي من الحفاظ بشكل دائم على عزف بيدريفسكي Pederewski، حيث كان المرء يتابع بنوع من التأثر تحرك ملمس البيانو تحت أناصمل فنان توفي منذ مدة طويلة. وكانت زيارة المتحف رفقة المرشد تتم في جو متنوع الأنغام، لأن كل آلة كانت تصدر الموسيقى الخاصة بها. لذلك كان الزوار يغادرون المكان مندهشين ومنتشين بفعل هذه البراعة الآلية، وهي حالة شبيهة بما يحصل عند نهاية يوم العطلة.

كنت أتوقف دائماً أمام لعبة للأطفال، يبدو أنها

وضعت في مكانها بالصدفة، ولذلك لم تكن تثير انتباه الزوار كثيراً. إنها عبارة عن لاعب جمباز صغير من القماش، موضوع داخل زجاجة ويمسك بعمود ثابت. ولما كانت يداه ممسكتين بالعمود، فإنه لم يكن يستخدم أية آلة موسيقية، بل كان يكتفي بالدوران حول العمود. لكنه كان يقوم بذلك، بطريقة مثيرة ومنتظمة، حيث يعطي الانطباع بتحركه وفق إرادته الخاصة وتغييره لموقعه حسب مزاجه أو هواه. وهكذا، كانت تصدر عنه حركة على اليسار وحركتان على اليمين، ثم ثلاث حركات على اليسار وخمس حركات على اليمين، وكانت الدورات تتوالى في هذا الاتجاه أو ذاك من دون أن نتمكن من توقع ما ستقوم به هذه الدمية الشيطانية المتحركة. إن الناظر إلى هذه التقلبات المتتالية وهذه التحولات في الوجهة التي لا تنقطع، سيكون مضطراً إلى التساؤل: كم دورة ستتم صوب هذه الوجهة، قبل الانطلاق صوب الوجهة الأخرى؟

لقد كان التناقض مثيراً. فمن جهة، تقدم الآلات الجميلة معلومة مشفرة، عن طريق النفْخ أو ضربات المطرقة؛ ذلك أن آلات الأرغن الصغيرة المتنقلة تبتلع الأشرطة الكرتونية المطوية، كما أن آلات البيانو الصاخبة

تلتهم اللفائف المملوءة بالهواء المضغوط. وتلك آلية رائعة وبارعة بكل تأكيد، لكنها لا تنطوي على أي سرّ، فنحن نعرف الموسيقى وندرك النغمة الموالية. وإذا ما رغبنا في سماعها من جديد، فيكفي تشغيل الآلة التي سيصدر عنها اللحن نفسه بالطريقة نفسها؛ وسيصبح هذا التكرار مملاً في النهاية.

وثمّة، من جهة أخرى، دمية متحركة تدور حول عمود ثابت، ببساطة ومن دون تكرار للحركة. وحينما تنطلق، لا نعرف وِجهتها، وعندما تأخذ اتجاهاً معيناً، لا نعرف سبب ذلك ولا كم من الوقت ستستغرقه الحركة. وهذا عرض جذاب، لأنه مفاجئ ويأتي دوماً بالجديد؛ بحيث نراهن على أن الإنسان الآلي الذي ينفخ في المزمار سيتوقف عن العمل قبل الدمية الصغيرة المتحركة.

هكذا، نجد من جانبٍ آليات معقدة بدون شك، لكن حركاتها متوقعة. لكن ماذا سنجد من الجانب الآخر؟ وكيف سنسمي ما نقتصر على ملاحظته فقط، من دون فهم ما يجري ومن دون تخمين ما يمكن أن يحصل؟ إن هذا الأمر يحمل اسماً جميلاً جداً عزيزي القارئ، هو الصدفة. ونحن سنحاول معرفتها في

البداية وبعد ذلك سنتعلم كيف نصنعها. وهو ما يشكل موضوع القسم الأول من هذا الكتاب. أما في القسم الثاني، فسنتساءل حول الدور الذي تقوم به الحواسيب داخل العلوم الحقّة. وبما أن النظريات أصبحت معقدة جداً، ولم تعد تسمح لنا بإجراء عمليات حسابية ذهنية، فإن الحاسوب أصبح وسيطاً لا غنى عنه، بين النموذج الرياضي والواقعة الفيزيائية التي يسعى إلى وصفها. وما تبرره نظرية السَّديم chaos، هو أن العمليات التي تنجزها الحواسيب نفسها أمرٌ يظل قابلاً للنقاش. فالحاسوب هو أداة جديدة مثلما كان منظار غاليلي Galilée وميكروسكوب لوينهوك Loewenhoek في فترة تاريخية معينة. ومثله مثل الآليات التي سبقته، فإنه يغيّرشروط البحث العلمي، لكن علينا أن نكون واعين بحدوده، إذا ما أردنا استخدامه بفعالية.

القسم الأول

آليّة الصدْفة

السّديم موجود،
لقد صادفته

دورة بالحلبة

لنشاهدْ هذا المهرج من جديد ولنحاول التركيز على ما يحمله من دلالات عامة أو علمية، إن صح التعبير. فالبيئة والموسيقى والتفسيرات وانطباعاتي الخاصة، اختفت جميعها الآن، كما أن مجموعة الآلات تبدَّدت وبتُّ أجهل مصير لاعب الجمباز الصغير. بيْد أن كل هذا لم يعد مهماً، فليست الصدفة المقترنة بمصيره هي التي تشغلنا، بل الصدفة الثاوية وراء تحركاته هي التي تثير انتباهنا. لنحركْه إذاً ولنحسبْ عدد الدورات التي يقوم بها في كل اتجاه قبل أن يتوقف في النهاية. هكذا، سنحصل على النتيجة التالية:

+ 5 2 2 2 2 2 3 2 2 3 1 4 4 1 2 3 4 3 5 2 4 3 1

وهو ما سندعوه ببروتوكول التجربة. تشير علامة «زائد» (+) إلى أن الدورة الأولى تمت في الاتجاه الذي تتبعه عقارب الساعة، أما علامة «ناقص» (−) فتشير إلى عكس ذلك. ويعني هذا البروتوكول أن لاعب الجمباز

قام في البداية بخمس دورات في اتجاه عقارب الساعة، ثم بدورتين في الاتجاه المعاكس، ومن جديد بدورتين في الاتجاه الأول، ثم بدورتين في الاتجاه الثاني، أي ما مجموعه 62 دورة بحيث إن آخر دورة تمّت في الاتجاه نفسه الذي اتبعته الدورات الخمس الأولى.

والملاحظ أنه لا يوجد ضمن هذا البروتوكول أي انتظام ظاهري ولا أي قاعدة لتسلسل الأرقام تسمح بالتنبؤ بالرقم الموالي، انطلاقاً من الرقم أو الأرقام التي سبقته. هكذا، نرى أن رقم 2 يكون تارة متبوعاً بالرقم نفسه، وتارة برقم 3 أو 4. كما أن الزوج 5 / 2 يكون تارة متبوعاً برقم 2 وتارة برقم 4. وإذا ما قدّم لي أحد الأشخاص الأرقام الاثنين والعشرين الأولى، وطلب مني «إتمام السلسلة»، أي التنبؤ بالرقم الثالث والعشرين، فإنني سأقترح الرقم 2 بحجة أنه هو المتكرر أكثر وبالتالي فهو الأكثر احتمالاً. وبفعلي لذاك، سأكون قد عدت إلى أقدم معتقدات الإنسانية، وهي أن المستقبل تكرار للماضي بالضرورة. فما حصل من قبل سيحصل من بعد، وما تكرر البارحة سيتكرر غداً. لهذا السبب، كان أجدادنا ينتظرون بكل ثقة طلوع الشمس بعد غروبها؛ فما دامت قد أشرقت مرات عديدة فإنها

ستقوم بذلك مرة أخرى.

يمكننا أن نذهب أبعد من ذلك والإقرار بأن الشمس كلما أشرقت فإنها ستزيد من عدد مرات شروقها وبالتالي من احتمال أن تشرق من جديد. وعلى هذا الأساس، يمكننا حساب احتمال شروق الشمس غداً (بنوع من التأكيد)، مع العلم بأنها أشرقت كل يوم منذ خمسة آلاف سنة على الأقل وليس على الأكثر. وعلى افتراض أن العكس قد حدث قبل ابتكار الكتابة، فإننا لا نتوافر على أي وسيلة تمكننا من معرفة حدث عجيب بهذا الشكل. فالعملية الحسابية دُوِّنت علمياً، وقد أنجزها لابلاس Laplace سنة 1812؛ وتقول الرواية إن هذا الأخير راهن بـ 1828214 مقابل 1، على أن الشمس ستشرق في الغد، هذا مع العلم أن خمسة آلاف سنة تساوي 1828213 يوماً. أما الآن، وبعد أن قامت الشمس بـ 183 سنة من الخدمة الإضافية المؤكدة، فإن بإمكاننا وضع شروط أفضل للحساب المذكور. وأظن أن القارئ سيتفق معنا بكون قانون الجاذبية لدى نيوتن Newton وعلم حركات الكواكب يشكلان أفضل حجة للاعتقاد بأن الشمس ستشرق غداً، وبأن بإمكاننا انتظار حلول المساء بثقة أكبر من الثقة التي كانت لدى أجدادنا.

أما بخصوص لاعب الجمباز الصغير فإنني أجهل تصرفه، مثلما كان إنسان الكهوف يجهل توالي النهار والليل. بإمكاني فقط حساب تكرار الظهور بناء على الملاحظات السابقة، على أمل أن يُحتَرم التكرار في المستقبل. هذا مع العلم بأن وضعيتي أسوأ من وضعية الإنسان القديم، لأنني لا أتوافر إلا على 22 حالة ملاحظة. ومع ذلك، باستطاعتي أيضاً المطالبة بملاحظات إضافية. فنحن لا نطالب الشمس بالإشراق، بل نسعى فقط إلى معرفة ما إذا كانت سلسلة من الأرقام قد بُنيت وفْق قاعدة معينة. وإذا ما وُجدت هذه الأخيرة، فإنها ستسمح لنا بمتابعة السلسلة إلى ما لانهاية، أي بتقديم الرقم الثالث والعشرين والرابع والعشرين والألف والمليون؛ باختصار، كل الأرقام التي يتعيَّن عليَّ معرفتها. ليس هناك رقم 0 ولا رقم 6 في الأرقام الاثنين والعشرين الأولى، لذلك نتساءل: هل من الممكن أن تغيب أرقام أخرى؟ والملاحظ أن رقم 5 يكون دوماً متبوعاً برقم 2، فهل هذه خصوصية مميزة للأرقام الاثنين والعشرين الأولى، أم أن الأمر يتعلق بقاعدة عامة؟

باختصار، كلما توافرت لدينا معطيات أكثر،

استطعنا الإحاطة بالإمكانيات بشكل أفضل؛ ولكي نقر بوجود قواعد دقيقة، متحكمة في تسلسل الأرقام، يجب علينا التوافر على بروتوكول يتوالى بدون توقف. وفي هذه الحالة فقط نستطيع فعلاً اختبار القواعد كلها وإزالة الشكوك كلها.

إن الدمية المتحركة ستتوقف بعد قيامها بستين دورة. وطبعاً، ليس من السهل إقناعها بالاستمرار في الدوران. لكن لدينا بديل آخر وهو دفعها للانطلاق من جديد. فلنعملْ على إعادة التجربة:

— 331341143133535222542

ولنقمْ بتجربة أخرى: 123545251554454132—

ثم بتجربتين إضافيتين: 13241453515351354322—

+5253531344225515213

هكذا نحصل على البروتوكولات التي نرغب فيها، لأن عددها مقترن بصبرنا الذي استنفد في المرحلة الخامسة؛ وهو ما يسمح لنا بإبداء بعض الملاحظات. وأولاها أن التجربة التي تعاد بالشروط نفسها لا تؤدي إلى النتائج نفسها. فنحن لا نلاحظ البروتوكول نفسه خمس مرات، بل خمس بروتوكولات مختلفة. تتمثل الملاحظة الثانية في كون هذه الأخيرة لا تتشابه أبداً،

فالتكرار المرتفع للرقم 2 بالبروتوكول الأول مثلاً، لا يتأكد في باقي البرتوكولات. أما الملاحظة الثالثة، فتتمثّل في أن البروتوكولات الأربعة الجديدة تؤكد على أن الأرقام محددة ما بين 1 و 5، لكنها لا تسمح مع ذلك بإبراز قاعدة لتسلسل هذه الأرقام. أكثر من ذلك، فهي تحطم القاعدة التي تم إقرارها بخصوص البروتوكول الأول، فرقم 5 لا يُتبع برقم 2 بالضرورة؛ وبإمكاننا أيضاً اعتبار هذه البروتوكولات الخمسة المختلفة بمثابة بروتوكول واحد وذلك عبر جمعها (والتغاضي عن العلامتين زائد + وناقص −)، كما في المثال التالي :

52222322314412343524313

31341114313353522542123

54525155445413213241453

15351354322525353134422

515213...

على عكس اللوائح السابقة، فإن هذه اللائحة تُختتم بثلاث نقط، وهذا يعني أنها لامتناهية افتراضياً. فبإمكاننا أن نحرك الدمية مرة سادسة وسابعة، وباختصار عدد المرات التي نرغب فيها في إضافة مزيد من الأرقام بهذه اللائحة. طبعاً، علينا أن نتوقف يوماً

ما لأننا لا نتوافر على الوقت الكافي ولا على الصبر اللازم لنقوم بهذه العملية لمدة طويلة. لكننا، من خلال تجريد رياضي شبيه بالتجريد الذي يسمح لنا برسم خط مستقيم على ورقة والإعلان بأنه يمثل خطاً مستقيماً لا متناهياً، نعتبر بأن الأرقام التي حصلنا عليها تشكل الدفعة الأولى من 102 رقم ضمن سلسلة لامتناهية، وبأن نقط الحذف تمثل الأرقام المتبقية؛ وهي تشير إلى ما يلي: «انتبهوا، إن اللائحة لم تكتمل وإنني أضع رهن إشارتكم كل الأرقام التي ترغبون فيها، ونظراً لضيق المكان اكتفيت بكتابة 102 رقم».

نستطيع انطلاقاً من هذا البروتوكول اللانهائي أو هذه اللائحة غير المحدودة، إبداء ملاحظات شبيهة بتلك التي أبديْناها من قبل. ويمكن تلخيصها في واحدة، هي أن ليس ثمة أي إجراء يسمح باستنباط أحد هذه الأرقام من تلك التي سبقته بطريقة مؤكدة. سنعبر عن هذه المسألة بصيغة أخرى، على طريقة سيرانو Cyrano، أي بصيغة مستفزة تتلخص في كون القاعدة الوحيدة هي عدم وجود أي قاعدة؛ وأيضاً بصيغة ميتافيزيقية تتلخص في كون الماضي لا يحدد الحاضر؛ وبصيغة عملية مفادها أنك إذا أردت تخزين عشرة ملايين رقم

من هذه الأرقام بحاسوبك، فإنك ستضطر إلى وضع رقم تلو الآخر بذاكرته، إذ لا وجود لبرنامج يسمح باقتصاد الزمان والمكان.

ولكي لا نذهب بعيداً سنقول إن الصدفة موجودة وقد صادفناها. إنها توجد عندما لا نتمكن من التأكد بشكل يقيني، وعندما لا يحدد الماضي الحاضر بشكل تام، وعندما لا نتمكن من تلخيص سلسلة من الملاحظات. صحيح أن هناك درجات على مستوى الارتياب، بحيث يسمح لنا استخدام حساب الاحتمالات بتقدير حصة الصدفة المتضمَّنة في المستقبل. فالاحتمال 0 و 1 يمثل اليقين في هذا الاتجاه أو ذاك. أما الاحتمالات الموجودة بينهما، فتعكس المعلومة التي يمكن أن نتوافر عليها. وستكون الصدفة بهذا المقتضى هي الارتياب بصدد المستقبل واستحالة التنبؤ بشكل مؤكد. والآن لنر، هل بإمكاننا صنع الصدفة بعد أن تمكنا من معرفتها؟

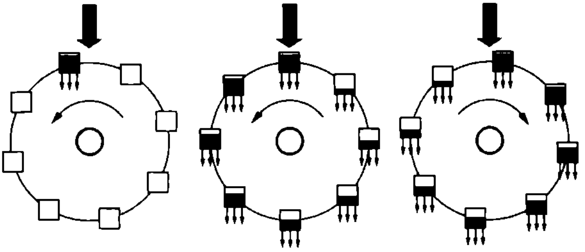
أدوات الصُّدْفة

تم الاعتقاد منذ مدة طويلة بأن الصدفة تتميز عن نقيضها المتمثل في معرفة المستقبل وفي التنبؤ التام،

مثلما يتميز الانتصار عن الهزيمة، بحيث يتوافر الأول على عدة أقارب، في حين تعتبر الثانية يتيمة. الحدث يرجع إلى الصدفة عندما تسهم عوامل عديدة في تحديده ولا يرجع إليها حينما يسهم عامل واحد أو عوامل قليلة في هذا التحديد. مثلاً، إن ظواهر الكسوف والخسوف تتوقف فقط على مواقع الشمس والأرض والقمر التي تحسب حركاتها بشكل جيد. وهذا أمر بسيط لا يتضمن أي صدفة، بل إن تاريخ ومكان الكسوف أو الخسوف المقبلين يعلَنان بالصحف. أما حالة الطقس فتتوقف على عدة عوامل متغيرة كالرياح والتيارات الهوائية ودرجات الحرارة والضغط الجوي وموقع الأعاصير ومركز الضغط الجوي المرتفع، وهي جميعها مهمة، لكن يبدو أن علماء الأرصاد الجوية، على عكس علماء الفلك، ليس بإمكانهم ضبطها كلها. والنتيجة هي أننا لا نعلم هل سيسقط المطر في تاريخ 14 يوليوز/ تموز من السنة المقبلة بباريس، على الرغم من أن فصول الصيف الحارة جداً التي عشناها في السنوات الأخيرة تدفعنا إلى اعتبار احتمال سقوط المطر في الفترة المذكورة ضعيفاً. هناك عوامل كثيرة مساهمة في تحديد هذا الحدث، وهي قابلة للتغير، لذلك لا يمكن التأكد

اليوم من حدوثها في السنة المقبلة.

والآن، ندعوكم إلى العودة مرة أخرى إلى لعبتنا ورؤية ما يختفي داخل الصندوق الذي يتحرك لاعب الجمباز بداخله. هناك ساعة رملية كبيرة تصب محتوياتها في دولاب مطحنة بحيث يحمل كل ذراع من أذرعه وعاءً في طرفه. وكل هذه الأوعية الصغيرة مثقوبة، لذلك فإن الرمل الذي يسقط فيها يندلق مثل الماء داخل مصفاة. وعندما تبدأ الحركة يشرع المخزون في صب محتواه داخل أول وعاء يوجد تحته. ويؤدي وزن هذا الأخير إلى تحرك الدولاب الذي يبدأ في الدوران. تسمح هذه العملية بإبعاد الوعاء الأول المفرغ من محتواه، عن الخزان وبذلك ستزداد سرعة الدولاب الذي سيجلب وعاء ثانياً تحت الخزان المذكور، ثم سيجلب وعاء ثالثاً ورابعاً، بحيث يتلقى كل واحد حصته من الرمل. وبطبيعة الحال، ستقترن هذه الحصة بسرعة الدوران، فكلما كانت دورة الدولاب أسرع، كلما قلَّ زمن ملء الوعاء وكانت الكمية أقل. بتزامن مع ذلك، يُفرغ كل وعاء من محتواه، أي يخف بوتيرة متناسبة مع قُطر الثقوب التي يندلق منها الرمل.



الدولاب. إليكم مبدأ الآلية المحركة لدمية حي بيرْطو. لقد كان الجهاز مختفياً وراء العلبة، وكانت الدمية موجودة بالمقدمة حيث ربط ذراعاها بمحور الدوران. هذا الأخير يحمل دولاباً تصب فيه ساعة رملية محتوياتها. كانت الأوعية تُملأ وتفرغ بحسب وضعها تحت الساعة الرملية المذكورة، كما كان الدولاب يدور من هذه الجهة أو تلك بحسب التوزيع (المتنوع طبعاً) للرمل داخل الأوعية. بذلك، كان محور الدولاب يدفع ذراعي الدمية.

يؤدي تركيب هذين المفعوليْن المتمثليْن في ملء الأوعية، بوتيرة تابعة لسرعة الدوران وفي الانسياب بإيقاع ثابت، إلى توزيع غير منتظم للأوعية المليئة أو الفارغة. فكلما امتلأ الوعاء ازداد وزنه وتحرك الدولاب في اتجاه معين. هذا الاتجاه سيتغير عند تحويل الوعاء المذكور لوجهته. بالتالي، فإن توزيع الكتل، في هذا الجانب أو ذاك من الدولاب، يتغير باستمرار مما يسمح بتسريع أو إبطاء فترات التحرك السريع التي تتخللها لحظات التوازن. وإذا ما قمنا الآن بتثبيت

ذراعيْ الدمية الصغيرة المتحركة بمحور الدولاب، فإنها ستدور بحسب حركة هذا الأخير. ويكفي إخفاء الآلية وراء حاجز لخلق الوهم بأننا أمام بهلوان ينوع ألعابه لتسلية الجمهور.

لماذا توقفنا طويلاً عند تحليل هذه اللعبة؟ لأن حركتها هي أفضل توضيح لنظرية السَّديم التي تتلخص في كون الارتياب غير مرتبط بالتعقُّد. إن تعدد العوامل والأسباب ليس هو المصدر الوحيد للصدفة، إذ يمكننا صنعها أيضاً بآليات بسيطة جداً. ويمكن أن تكون هذه الآليات فيزيائية، مثلما هو الشأن بالنسبة لبهلوان حي بيرْطو، أو ذهنية كما هو الحال بخصوص بعض النماذج الرياضية؛ ذلك أن لكل آلية طريقتها، فهي بسيطة أي أنها تسمح بتدخل عدد ضئيل من العوامل. وتعمل الآليات كلها على إنتاج الصدفة بنفسها من دون اللجوء إلى مصادر خارجية، كما أن لديها اسماً مشتركاً هو الأنظمة السَّديمية.

هنا تواجهنا مفارقة حقيقية، إذ كيف نستطيع الحصول على الارتياب من لاشيء؟ نحن نعرف كيفية اشتغال النظام وما هي العوامل المحدِّدة له، كما نعلم بأنه لا يخضع لتدخل خارجي وأن تطوره لن يكون

مفاجئاً لنا. والآن، وبعد أن تسلَّلنا وراء الدمية المتحركة وفهمنا آلية حركتها، بإمكاننا أن نضبطها وننظم كمية الرمل ووضعية الدولاب. أين توجد الصدفة إذاً؟ إن لاعب الجمباز لا يتوافر على أي هامش للحرية، فحركته محدَّدة بشكل تام، وإذا ما كانت عمليات الضبط الأساسية واحدة، فإن ما سينتج عنها سيكون واحداً أيضاً. ومع ذلك، فإن ما نلاحظه لا يؤكد هذا الإقرار. ذلك أن تكرار التجربة مرتين لن يسمح لنا بإعادة إحداث السلاسل الأولى للاهتزاز رغم محاولة ضبط النظام الأساسي. فانطلاقاً من لحظة معينة، تتم ما بين الدورة العاشرة والدورة العشرين، يحصل نوع من التفكك، حيث تنفصل الحركتان ولن تصبح هناك أي علاقة بين سلاسل الاهتزازات.

تدرس نظرية السَّديم كيف يمكن أن تحصل مثل هذه الأمور وكيف تُكتسب آليات معينة حرية لم تكن متوافرة لديها أثناء الشروع في الحركة؟ إن الجواب يقع داخل هذا الهامش الدقيق الذي يفصل بين الصفر الرياضي، أي اللاشيء تقريباً، والدقة المطلقة لأفضل تقريب. ويبدو هذا الهامش صغيراً جداً وقابلاً للاختزال، إلا أن الأنظمة السَّديمية ستلعب في هذا الإطار دور

الميكروسكوب، وستعمل على تضخيمه بحجم الكون. وبيان ذلك أن المبدأ الأساس الذي تعمل بمقتضاه هو مبدأ التزايد الأسّي croissance exponentielle الذي يمكنه، كما سنرى، أن ينقلنا بسرعة من الأكبر حجماً (وهو الكون برمته) إلى الأصغر حجماً (وهي الجزيئات الأولية).

لنبدأْ بالأكبر حجماً. لقد اكتشف المسبار الفلكي هابل Hubble وجود الهيليوم (وهو عنصر غازي خفيف الوزن) على بعد 15 مليار سنة ضوئية. وهنا أيضاً يبرز سحر الأرقام؛ فنحن نكتب هذا الرقم من دون التفكير في المسافة التي يمثلها. ومع ذلك فهو يعني أن الضوء الذي نتلقّاه اليوم قد استلزم 15 مليار سنة بسرعة 300 ألف كيلومتر في الثانية، وبالتالي فهو أحد الشهود على الانفجار الكوني الهائل (البيغ بانغ). فلو توافرت لدينا خريطة عامة للكون بسلمٍّ واحد على مليون مليار مليار، فإننا لن نلاحظ شيئاً ذا أهمية، اللهم مجموعة من حبات الغبار في الهواء.

لنتخيلْ بأن هذه الخريطة ذات أبعاد ثلاثة وبأنها موجودة بشكل متكتّل بالحاسوب، مثلما هو الشأن في خرائط الملاحة. فإذا أردنا الحصول على بعض

التفاصيل، علينا تكبير الصورة الظاهرة على الشاشة، عبر تقريب صورة المنطقة التي تهمنا. ويقتضي ذلك القيام بنقْرة بسيطة بواسطة الفأرة. ولتوضيح الأمر، لنقلْ إن التقريب قد مكّن من تكبير الصورة عشرة أضعاف. وإذا لم يتبيّن لنا أي شيء، فإننا سنقوم بتقريب الصورة من جديد، بذلك ستكون الصورة الجديدة (الثالثة) قد كُبِّرت مائة مرة مقارنة بالصورة الأولى. وبعد ثلاث عمليات لتقريب الصورة، تظهر مجرّتنا وهي درب التبّان كنقطة مضيئة وسط نقط أخرى. وبقيامنا بعملية تكبير الصورة مرتين، نحصل على صورة مفصلة. هكذا سنتعمق أكثر وسنقوم بخمس عمليات أخرى لتقريب الصورة حيث سنرى الشمس، وسنضيف خمس عمليات لتبرز الأرض أمامنا وخمس عمليات أيضاً لنحصل على خريطة أرضية بسلم واحد على مليون. وإذا ما أضفنا ست عمليات لتقريب الصورة، فإننا سنبلغ سلم الوحدة أي سنتعرف على الأشياء في حجمها الواقعي. فبين السلم البشري وسلم الكون توجد في آخر المطاف 25 عملية تقريب للصورة، أي 25 أس عشرة.

لنقمْ الآن بعملية نزول. فعند خمسة طوابق تحتية

سنتعرف على الخلايا الحمراء hématies والكريات البيضاء leucocytes. وإذا نزلنا أربعة طوابق أخرى، فإننا سنشاهد الذرات. وتوجد الأنْوية noyaux بخمسة طوابق من تحت، لكننا لن نتمكن من رؤية أي شيء هنا لأننا سنكون قد بلغنا مستوى الفوتون الضوئي photon وهو شيء يسْتعصي على التوضيح. أما أصغر الموضوعات الفيزيائية المعروفة فهو الكوارك quark (ويتعلق الأمر بجزيْء بسيط يُفترض وجوده لفهم بنية الميزون والباريون)، ويوجد بطابقين أو ثلاثة طوابق من تحت.

هكذا ننتقل من المجرات إلى الكواكب عبر 43 صورة. وقد أنجِز شريط سينمائي وكتاب حول هذا المسار المثير. ولا توجد وسيلة أفضل لملامسة تأثير التزايد الأُسّي، فمن أسّ عشرة إلى آخر، ننتقل عبر 40 عملية من الكون برمته إلى المكونات الأولية للمادة.

هنا يبرز الاختلاف الأساسي بين الفيزياء والرياضيات. ففي مجال الفيزياء تظل الدقة محدودة، وإذا ما حاولنا مثلاً تحديد حجم الكوارك بسلّم تحت ذري subatomique (أي متعلق بجسيمات أصغر من الذرة)، فإنه سيبلغ تقريباً

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 01

من حجم درب التبانة. فمن أكبر جسم إلى أصغره، هناك فقط 40 عشرية 40 décimales. ولا جدوى إذاً من محاولة إعطاء قياس أدقّ.

بالمقابل، تُعتبر الدقة في الرياضيات لامحدودة. وعلى سبيل المثال، فإن العدد بي Pi (π) الذي يقيس علاقة محيط الدائرة بشعاعها، يتوافر على ما لانهاية له من العشْريات التي نعرف مليارات منها في الوقت الحالي. وتُعتبر الأرقام الستة الأولى π= 3,14159 التي يتم تحويلها إلى 3,1416، كافية للاستخدام التطبيقي. هذا، مع العلم أن العشريات التي لم تُحسب، تظل مع ذلك موجودة، ومن الممكن إبراز بعض خصائصها. فنحن نعرف مثلاً بأن المتتالية العشرية للعدد بي π ليست دورية، إذ لن نجد في المتتالية العشرية π=3,1415926535.. دائرة موجهة تتكرر بشكل لا محدود، كما هو الشأن بخصوص المتتالية العشرية 1/7=0,142857142857142857....

فبالنسبة للرياضي، يتوافر العدد على ما لانهاية له من العشْريات، أما بالنسبة للفيزيائي فهو لا يتوافر على أكثر من أربعين. بهذا المقتضى، يعتبر النظام السَّديمي بمثابة تقريب للصورة، شبيه بالتقريب الذي استخدمناه

للسفر عبر الكون في أربعين مرحلة، إذ يتعلق الأمر بآلية لتكبير الصورة. يكشف انسياب الزمن عن تفاصيل دقيقة أكثر فأكثر، مثلما تسمح لنا النقرات المتتالية على الشاشة بالتعمق أكثر فأكثر في الصورة. ولا يُنتج النظام الصدفة، بل يكتفي بإبراز الأشياء الموجودة التي لم تخضع للملاحظة، لأنها كانت مخفية في أعماق يتعذر بلوغها. وإذاً، ما المقصود بالنظام السَّديمي؟

إنه أولاً نظام حتمي، أي أن حركته في المستقبل محدَّدة تماماً بحالته في الحاضر، وهو ما ندعوه بالشروط البدْئية للحركة. فمقابل شرطين بدْئييْن متشابهين يوجد مساران متشابهان، ومقابل شرطين بدئيين مختلفين يوجد مساران مختلفان. هكذا، يُحدَّد مسار كرة القدم بقذْفة اللاعب، مثلما يحدَّد مسار قطعتين من النرد برمية اللاعب. طبعاً، يصعب بل يستحيل أن يقذف اللاعب الكرة أو أن يرمي لاعب النرد القطعة مرتين متتاليتيْن، بالدقة والطريقة نفسيهما. من الممكن أن تتمَّ العملية بالطريقة نفسها تقريباً إذا كان اللاعب ماهراً، لكن يوجد دوماً فارق مهما صغر، بين ما نريد فعله وما نفعله.

بذلك، نقول عن نظام إنه سديمي عندما يوسِّع من

الفوارق البدئية. فضلاً عن ذلك، يجب أن يكون هذا التوسيع أُسِّياً، أي أن تتضاعف الفوارق على فترات منتظمة بدل أن تنْضاف إلى بعضها بعضاً. وبعبارة أدق، فإن كل نظام سديمي يقترن بمدة زمنية (T) بحيث إن الفارق بين مسارين متجاورين في البداية سيتضاعف عشر مرات خلال المدة الزمنية (T). فإذا كان الفارق البدْئي هو d فإنه سيصبح 10d بعد المدة T و $100d$ بعد المدة $2T$ و $1000d$ بعد المدة $3T$ وهكذا دواليك. وببساطة، سنقول إن المدة T هي الزمن الفلكي للنظام السَّديمي. وكلما كان هذا الزمن قصيراً، كلما تفرقت المسارات بسرعة وأصبح النظام سديمياً أكثر. بيد أن توسيع الفوارق لا يمكن أن يستمر إلى ما لا نهاية، وإلا فإننا سنكون قد اجتزنا 40 أس عشرة بعد انقضاء الفترات الأربعين من الزمن المذكور، وسنخرج بالتالي عن حدود الكون. وانطلاقاً من لحظة معينة، أي عندما تبلغ الفوارق حجماً كافياً، تتوقف ظاهرة التوسيع وتصبح عملية تقريب الصورة غير ذات فائدة. وبصيغة أخرى، فإن النظام السَّديمي يوسع الفوارق الصغيرة وحدها، بحيث يسمح بارتقاء الظواهر المجْهرية إلى المستوى المرئي بالعين المجردة. أما التحولات الكبرى

فإنها تولِّد أيضاً كما هو متوقع تحولات كبرى من دون أي توسيع مميَّز.

هكذا، فإن الصدفة تقع داخل توسيع التحولات الصغرى. ويفيد المبدأ الأساس للحتمية بأن موقعين بدئيين متشابهين يولِّدان المسار نفسه. لكن المشكلة تكمن في استحالة منح الوضع نفسه للنظام الفيزيائي، إذ يوجد دوماً فارق ولو كان بحجم الذرة. وقد سبق لهيرقليطس في القرن الخامس قبل الميلاد أن لاحظ بأننا لا يمكن أن نعبر النهر نفسه مرتين. لكنه لم يستخلص، على الأرجح، كافة النتائج المترتبة عن هذه الملاحظة. فمضاعفة زمن النظام السَّديمي الفلكي تسع مرات يحوِّل طول الفارق إلى متر. وبذلك نحصل على ظواهر بادية للعيان ونرجعها إلى الصدفة، لأن أسبابها غير منظورة.

لنعدْ الآن إلى مثالنا الأول وهو لاعب الجمباز المتحرك. فالأمر يتعلق بنظام سديمي زمنه الفلكي هو عشر ثوانٍ. وإذا ما أردتُ أن يتكرر المسار نفسه مرتين متتاليتيْن، فيجب عليَّ أن أحدث الوضع البدئي نفسه من جديد. ولن أقوم بمراقبة وضعية كل حبة رمل داخل الخزان، مع العلم بأنني مطالب بالقيام بذلك. فبعد

دقيقة، سيتضاعف تأثير حبة الرمل هاته إلى مليون منذ انطلاق الحركة، أي ما يعادل كتلة من الرمل. وبسرعة وبفعل عمليات التوسيع المتتالية، سيصبح الفارق الذي كان مجْهرياً في البداية، تحولاً بادياً للعيان. وبما أنني لم أتمكن من ملاحظة العملية الأولى، فإنني لا أستطيع توقع الثانية. وفي هذه الحالة بالضبط، يمكن فهم آلية التوسيع. فالدولاب الذي يجر معه الدمية أثناء حركته، يبلغ وضعية توازن. لكنه سيتردَّد حينما يكون ممتلئاً من الجهتين، في اتّباع الاتجاه الذي سينطلق نحوه من جديد. وفي تلك اللحظة، ستكون حبة الرمل الأولى التي ستسقط من الخزان، أو تلك التي ستندلق من الوعاء، هي التي ستسمح بميل الكفة إلى هذا الاتجاه أو ذاك، بعدها ستتبع الحركة اتجاهاً واحداً. لكن سقوط حبة الرمل بشكل مبكِّر أو متأخر أمر يتوقف على لاشيء تقريباً، فقد يتعلق بضيق الثقب أو بوضعية الحبات الأخرى، أو بكل الوضعيات المجْهرية التي يستحيل تنظيمها مسبقاً غير أن نتائجها تكون بادية للعيان.

هناك مثال آخر معروف جداً هو مثال النرْد. فعندما تُرمى القطعة على البساط الأخضر أمام النظرات المنتبهة

والقلقة للاعبين الذين يحرصون على ألا يعترض حركتها أي عائق، فإن مسارها يكون محدَّداً كلية بقوانين الميكانيكا. لكن الأمر يتعلق بنظام سديمي؛ وبيان ذلك أن الاختلاف الطفيف في طريقة رمي القطعة سيتسع مع تدحْرجها، بحيث تظل النتيجة النهائية غير متوقَّعة. لهذا السبب يفضَّل اللعب بقطع نرد عديدة، يُشترط عدم استعمالها كثيراً لرميها من جديد. من ثَمّ، فإن خصومكم سيعرفون جيداً بأن توافر هذه القطع المتعددة سيضفي سديمية أكبر على النظام وسيتطلب وقتاً أكبر لبروز مفعول التوسيع. وينطبق الأمر نفسه على استخدام الوعاء الصغير الذي يوضع فيه النرد ويتم خضُّه قبل رميه، حيث تضعف مراقبة الوضعية البدئية، مما يمنع من رمي القطعة مرتين متتاليتين بالطريقة نفسها. وهي العملية التي يتقنها الشيطان وحده، حتى ولو تضمن الوعاء المذكور ست قطع، ومن المستحسن عدم اللعب ضده.

إن نظرية السَّديم تدرس هذا النوع من الآليات وذلك من جهتين. فهي تسعى، من جهة، إلى معرفة طبيعة الصدفة التي توجد ببعض الظواهر الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية والاقتصادية أو الاجتماعية.

هل هي تصدر عن نظام سديمي يتعيَّن التعرف عليه، أم تصدر عن شيء آخر؟ وهي تراقب، من جهة أخرى، الأنظمة الموجودة التي دُرست في الغالب ومنذ مدة، لمعرفة ما إذا كانت تتوافر على مكون سديمي لم ينتبه إليه الملاحظون. وسنعمل على توضيح المقاربتين بالاعتماد على مثالين شهيرين هما: علم حركات الكواكب mécanique céleste وعلم الأرصاد الجوية.

على الأرض كما في السماء

الميكانيكا السماوية: بوانكاري Poincarré

تمَّ منذ العصور القديمة التمييز بين النجوم الثابتة والنجوم السيّارة. وتطلَّب الأمر من الإنسانية آلاف السنين لمماثلة هذه الأخيرة بالكواكب التي تدور حول الشمس، كما هو شأن الأرض، واكتشاف قوانين حركتها. ولقد أسهمت أشهر الأسماء في العلم الحديث في تأثيث مسار هذا التقدم. هكذا، قام كوبرنيك بوضع الشمس لا الأرض في مركز الكون. واكتشف كيبلر Kepler بأن الكواكب تقوم بحركة إهليلجية تشغل الشمس موقعاً في إطارها، وهو ما يميز سرعة مسارها. وربط نيوتن كل القوانين التي اكتشفها كيبلر، بقانون واحد وهو قانون الجاذبية الذي مفاده أن المادة تجذب المادة مباشرة بفعل كتلتها وعكس بالنسبة لمربع المسافة الفاصلة بينها. وبصيغة أخرى، إذا كان وزن جسم ما هو ضعف وزن جسم آخر فإنه يمارس على هذا الأخير قوة جاذبية مضاعفة؛ وإذا كان بعيداً بشكل مضاعف فإنه يصبح أضأل منه بأربعة أضعاف.

بذلك يتم المرور من الفيزياء إلى الرياضيات. فمن خلال قوة الجاذبية الممارسة على جسم معين، بوصفها ظاهرة فيزيائية، يمكننا أن نستنبط تسارع حركة هذا الجسم كمفهوم رياضي، وحساب مساره الكامل انطلاقاً من وضعيته وسرعته البدئيتيْن. وقد سمحت لنا معرفة الحالة الراهنة للنظام الشمسي بتوقع تطوره المستقبلي، وبهذا المقتضى مكنت الفيزياء النيوتونية من إدراج مفهوم الحتمية في العلم. وهكذا، بيَّن نيوتن في كتابه «المبادئ» الصادر سنة 1687، كيف يمكن أن نستنبط القوانين الثلاثة لكيبلر من الجاذبية التي تمارسها الشمس على الكواكب، وذلك بالاعتماد على براهين هندسية خالصة. ومن الآن فصاعداً، ستبدو المدارات الإهليلجية وسرعة المسارات وأزمنة الكواكب، كنتائج عامة لهذا القانون البسيط الذي لم يكن نيوتن أول من أعلن عنه (إذ يرجع الفضل في ذلك بدون شك إلى هوك Hooke، ضمن رسالة بعثها إلى هذا الأخير بتاريخ 6 يناير / كانون الثاني 1680)، لكنه كان الوحيد القادر على استخلاص نتائجه الرياضية.

وقد بيَّنت مجهودات العلماء اللاحقين كيف أن بإمكان هذا القانون الوحيد تفسير كل حركات

الكواكب والنجوم، وكيف تسمح نظرية نيوتن بالتنبؤ بدقة بالظواهر الفلكية. ولهذا الغرض، تم جمع ملاحظات غنية وكثيرة منذ القدم ونقلها بنوع من الدقة، من جيل إلى آخر من الفلكيين. بذلك، استمر التدرُّج، من الكلدانيين إلى الإغريق والرومان والعرب، وأصبحت نظرة عالم الفلك الحديث تشمل أكثر من ألفي سنة. وعلى سبيل المثال، فإن بطليموس نقل إلينا في القرن الثاني الميلادي ضمن كتابه «المجْسطي» *Almageste* ملاحظات كلدانية سابقة بستة قرون. وبما أن الحركات الفلكية تعتبر بطيئة بالنسبة لسلم الحياة البشرية (فدوران كوكب زحل حول الشمس، مثلاً، يتطلب 30 سنة، أما دوران مذنب هالي Halley فيتطلب 75 سنة)، فيتعيَّن التوافر على رؤية جماعية تسمح بالرجوع إلى الماضي من أجل معرفتها.

سيلاحظ المرء بسرعة كيف أن قوانين كيبلر لا تتسم بالدقة الصارمة المطلوبة وكيف أن الملاحظات القديمة لا تتلاءم مع توقعاتها. وبيان ذلك أن قانون نيوتن صحيح[1]، لكنه لم يأخذ بعين الاعتبار سوى جاذبية الشمس. تمثل كتلة المشتري 1/1000 من كتلة الشمس، وبما أنها بعيدة عن الأرض بخمسة أضعاف، فإنها

تمارس على هذه الأخيرة قوة جاذبية تناهز 1/25000 من قوة الشمس وتنتظم معها. لهذا ستتأثر حركة الأرض حول الشمس بشكل طفيف، بفعل حضور المشتري (والكواكب الأخرى). ويمكننا أن نتساءل عما إذا لم تكن هذه التأثيرات الطفيفة المتراكمة على مدى قرون، قادرة على خلق فوارق مهمة قابلة للملاحظة بالوسائل البدئية لتلك الفترة.

ستتأكد هذه الفرضية بشكل جيد خلال القرنين التاليين، حيث سيتّسم تاريخ علم الفلك بتحقيق عدة انتصارات. فقد قام كل من لالاند Lalande وكليرو Clairaut بحسابٍ أظهرا من خلاله كيف أن تأثيرات المشتري وزحل أخرت عودة مذنب هالي بسنة وثمانية أشهر، وحدّدا تاريخ هذه العودة في أواسط شهر أبريل/ نيسان 1759، بتقديم أو تأخير شهر واحد. وبالفعل، ظهر المذنّب كما كان متوقعاً، ومرَّ من النقطة المحددة بتاريخ 12 مارس / أذار. وفسر كل من أدامز Adams سنة 1845 ولوفيريي Le Verrier سنة 1846، التفاوت الملاحظ في مسار أورانوس منذ اكتشافه سنة 1781، وذلك نتيجة وجود كوكب مجهول، وقاما بحساب عناصر هذا المسار. وبتاريخ 18 سبتمبر / أيلول 1846، كتب

لوفيريي إلى عالم فلكي من برلين، اسمه غال Galle، رسالة حدد فيها إحداثيات الكوكب. وما إن تلقى هذا الأخير الرسالة حتى قام بتوجيه منظاره صوب كوكبة نجوم برج الدلو Constellation du Verseau بالمكان المحدد. وبتاريخ 25 من الشهر نفسه، بعث إلى لوفيريي بالجواب التالي: «سيدي، إن الكوكب الذي حددتم موقعه يوجد فعلاً». وكان لهذا النجاح صدى واسع في تلك الفترة؛ مثلما أن اكتشاف الفضاء في زمننا، من أول قمر صناعي «سبوتنيك» سنة 1957 إلى رحلة أبولو سنة 1969، قد سمح بتحقيق أقدم أحلام الإنسانية. وهذه جميعها توكيدات تجريبية لقانون نيوتن، بحيث يمكن القول إنه من القوانين القليلة التي تم تأكيدها، فهو الوحيد الذي يفسر حركات النظام الشمسي.

وقد أدى تقدم العلوم إلى تعديله جزئياً، لكي تؤخذ نظرية النسبية العامة (لأينشتاين سنة 1915) بعين الاعتبار. غير أن هذا التعديل النسبي ضعيف جداً، وأبرز ما فيه هو الإقرار بتفاوت قدره 42 ثانية في السنة عند حساب حركة عطارد.

لكن، هل يكفي فهم آلية الحركة لتوقع التحرك؟ سيكون جواب تاريخ علم الفلك برمته إيجابياً على ما

يبدو. فنحن نتوافر اليوم على روزمانة تمتد على مدى 44 قرناً، أي أننا نعرف بشكل دقيق مواقع الكواكب والقمر منذ أكثر من أربعة آلاف سنة؛ ويمكننا استخدامها مثلاً، للتعرف على الكسوف وعلى الظواهر الفلكية التي ذكرت في الأزمنة القديمة وتحديد بعض التواريخ بدقة. وبطبيعة الحال، سيصعب علينا إيجاد شيء من عدم الانتظام في النظام الشمسي، أو شيء من الصدفة في حركة الكواكب. وإذا ما كنا سنتنبأ بالمستقبل، فإن إحدى الحقائق التي يمكن الإعلان عنها من دون تخوف من الخطأ تتمثل في كون الشمس ستشرق غداً، بمعنى أن الأرض ستستمر في متابعة مسارها المكتشف من طرف كيبلر.

إن كل ذلك يعتبر وهماً، ليس من الناحية البصرية بل من ناحية المقياس. فنحن نعلم اليوم بأن النظام الشمسي سديمي، لكن زمنه الفلكي يحدَّد في عشرة ملايين سنة (مع التذكير بأن الأمر يتعلق بزمن يتضاعف فيه الاضطراب إلى عشرة). وتعتبر هذه المدة طويلة جداً مقارنة مع مقياسنا. فمنذ عشرة ملايين سنة، وهو العصر الثالثي، لم يكن الإنسان موجوداً على الأرض. لكنها فترة تعتبر قصيرة بمقياس النظام الشمسي الذي تشكَّل

منذ حوالي خمسة مليارات سنة، أي خمس مائة مرة ضعف الزمن الفلكي. وهي المدة المتبقية له نفسها على الأرجح. وما أدركته الإنسانية خلال وجودها القصير عبارة عن فترة من هذه المدة الطويلة وليس مسارها الكامل، أو هو بمثابة صورة وليس فيلماً. ويكفي أن نتأمل في الواقعة التالية: وهي أن كوكب نبتون الذي اكتشف من طرف لوفيريي منذ حوالي 150 سنة، لم يكمل دورته حول الشمس بعد!

تقترن الخاصية السَّديمية للنظام الشمسي باسم عالميْن رياضيين يعتبران من أشهر علماء القرن العشرين هما الفرنسي هنري بوانكاري H. Poincaré (1854 – 1912) والروسي أندري كولموغروف A. Kolmogorov (1903 – 1987). فقد اهتما تِباعاً بمعادلات حركات الكواكب، بحيث شكلت نتائج أعمالهما أساس النظرية الحديثة للأنظمة الدينامية. هكذا اكتشف بوانكاري بعض الوضعيات المؤدية بالضرورة إلى الحركة السَّديمية. وتعرَّف كولموغروف، من جهته، على وضعيات أخرى مؤدية بالعكس إلى حركة مستقرة ومتوقَّعة بشكل جيد، وبيَّن كيف أن المسارات تتحرك بشكل لامحدود حول بعض المواقع المتوسطة، كما أكد

بأن الاضطرابات الصغيرة لا تكبر خلال هذا التحرك، مما يسمح بتوقعات على المدى البعيد. والسؤال الذي يواجهنا هنا هو معرفة ما إذا كان النظام الشمسي يوجد بالوضعية التي وصفها بوانكاري أو بالوضعية التي وصفها كولموغروف.

يكمن الجواب في حساب طويل ومعقد، في غير متناول الوسائل التقليدية المتمثلة في الورق والقلم وجدول اللوغاريتمات وحتى الآلات الحاسبة. ففي نظر للابلاس Laplace ولوفيريي، ورغماً عن عبقريتهما وصبرهما، فإن الحد الأقصى للتوقع لا يتجاوز مليون سنة. هذا مع العلم بأن الأمر يتعلق بتوقع تقريبي يهم العناصر الرئيسة للأفلاك؛ أما إذا تعلق الأمر بحساب الوضعيات الدقيقة، فإن الأفق سيكون أقرب ما دامت أهم روزنامة متوافرة اليوم لا تغطي سوى 44 قرناً. والحال أننا نعلم اليوم بأن الاضطرابات لا تكون بادية إلا في إطار زمني أوسع يناهز 100 مليون سنة. لهذا كان من اللازم انتظار التقدم الحاصل في التقنيات الرقمية والأدوات المعلوماتية، لكي نتمكن من متابعة النظام الشمسي وتدقيقه على مستوى المدة المذكورة.

ولفهم نتائج هذا الاصطناع، ينبغي التفكير في

بنية النظام الشمسي. فحسب مقياسنا الزمني، تقوم الكواكب بحركات إهليلجية تشغل الشمس في إطارها موقعاً خاصاً، مع العلم بأن هذه الحركات تتم في الاتجاه نفسه تقريباً. وهناك تسعة كواكب منقسمة إلى كواكب داخلية (وهي عطارد والزهرة والأرض والمريخ) وكواكب خارجية (هي المشتري وزحل وأورانوس ونبتون وبلوتون). ويقوم هذا الأخير بدور خاص نظراً لكتلته الضعيفة جداً، بحيث لا يؤثر على باقي مكونات النظام الشمسي. طبعاً فإن أكبر كوكب هو المشتري، وتليه الكواكب الخارجية الأخرى. وبين المريخ والمشتري لا يوجد أي كوكب، بل حزام من النيازك وعدد لا يُحصى من الأجسام المختلفة الأحجام التي تدور حول الشمس.

خلال سنة 1988 تابع ج. ج. سوسمان G. J. Sussman و ج. ويسدوم J. Wisdom من معهد ماساسوشيتس للتكنولوجيا MIT، بالاعتماد على التقنيات الرقمية، مسار الكواكب الخارجية على مدى 875 مليون سنة، وذلك بفضل آلة حاسبة ضخمة أنجِزت لهذا الغرض، وبرهنا على أن حركة بلوتون كانت سديمية، في زمن فلكي يناهز 50 مليون سنة. وفي سنة

1989، تابع جاك لاسكار J. Laskar من مكتب خطوط الطول، مسار النظام الشمسي برمَّته لمدة 200 مليون سنة، وبرهن على أن حركة الكواكب الداخلية، ومن ضمنها كوكبنا، كانت سديمية في زمن فلكي يناهز 10 ملايين سنة.

هكذا فإن سنتميتراً من عدم الدقة في تحديد موقع هذه الكواكب سيتحول إلى مليون كيلومتر من عدم الدقة، بعد انقضاء 200 مليون سنة، وهو ما سيمنع طبعاً كل توقع بخصوص هذا المستوى الزمني. وهنا تبرز الصدفة، لأننا لا نستطيع التمييز بين المواقع والسرعة البدْئية المؤدية إلى مسارات مختلفة رغم كل شيء. وباستطاعتنا التعرف على مختلف الإمكانات وتقدير احتمالاتها المتتالية بالقيام بالتجربة من جديد، حيث يتم الاعتماد على نقط عديدة للانطلاق، متقاربة في ما بينها لكي لا يتميز بعضها عن بعض، والقيام بحساب المسارات المقابلة لها.

لقد أنجز لاسكار هذه التجربة سنة 1994 وتوصل إلى خلاصات تبيّن أن مدارات الكواكب الخارجية الكبرى، من المشتري إلى نبتون، تتسم بالاستقرار؛ فهي لم تخضع لتغيرات تستحق الذكر منذ مليارات

السنين. أما حركات المريخ والأرض فهي سديمية، لكنها تظل معزولة داخل رقع منفصلة. لهذا، لا يبدو أن هناك إمكانية لاصطدام الأرض بالمريخ أو الأرض بالزهرة.

بالمقابل، يمكن أن تقترب هذه الكواكب بعضها من بعض (أو تبتعد بعضها عن بعض) أكثر مما هو عليه الأمر في الوقت الحالي. وقد أثار كوكب الزهرة علماء الفلك كثيراً، لأنه لا يدور حول نفسه (أي لا يقوم بدوران خاص به) في اتجاه الكواكب الأخرى نفسها. فإذا كان المرء فوق الزهرة وتوجه صوب النجمة القطبية، فإن الشمس ستشرق أمامه من الغرب وستغرب من الشرق. وقد اكتشف لاسكار بأن السَّديم يتجلى في حركة الزهرة، وهو ما أسهم في قلب هذا الكوكب عدة مرات منذ وجود النظام الشمسي. ومن الممكن أن يكون كوكب الزهرة اليوم مقلوباً بالمقارنة مع وضعه البدْئي.

أما عطارد، فهو أقرب الكواكب إلى الشمس، بحيث تعتبر حركته أكثر سديمية. ومن الممكن أن يؤدي عدم استقرار مداره إلى الابتعاد عن الزهرة. لذلك، يعتبر الاصطدام معها أو الانقذاف خارج النظام الشمسي

أمراً ممكناً؛ بل إن لاسكار تمكَّن من «دفع عطارد نحو المخْرج» مستعيناً بين الفينة والأخرى بعمليات نقر ذكية على الحاسوب.

لن نطيل الحديث عن هذا النموذج الذي تُعتبر سلطته التفسيرية هائلة بكل تأكيد. ويمكننا أن نتساءل: «ما الذي كان سيقع لو أن...؟» و «ما الذي سيقع لو أن...؟». هكذا سنعلم بارتياح أن القمر لو لم يكن موجوداً لأصبح ميْل الأرض في مدارها (أي في خط العرض المداري، وهو 23 درجة في الوقت الحالي) سديمياً بشكل كبير. ويمكن أن ينتقل من 60 إلى 0 درجة (بالتالي ستكون الأرض مائلة تماماً) خلال مليوني سنة، مع النتائج المناخية التي يمكن تخيلها.

سنكتشف أيضاً بأن النظام الشمسي ممتلئ، بمعنى أن زيادة كوكب آخر ستؤدي إلى اضطراب كبير ينتج عنه في فترة وجيزة (بالمقياس الفلكي طبعاً) اصطدام بين مكونات النظام المذكور أو خروج بعضها عن مدارها. وإذا تأملنا الأمر جيداً، فإن كل مكون زائد من قبل لم يجد مكانه داخل النظام، وهو أمر يبدو منطقياً. وربما تسبح بعض الكواكب في وقتنا الحالي داخل الفضاء البيْن نجمي interstellaire لأنها طردت من «العائلة»

وافتقدت منذ مدة نور الشمس.

لا أريد أن أنهي حديثي تاركاً الانطباع بأن المشكلات الكبرى لعلم حركات الكواكب لم تُحلَّ إلا في القرن العشرين، وبأن علماء الفلك لم يكتشفوا شيئاً يذكر في القرون الماضية؛ بل على العكس، إذا ما كنا قد تعرفنا على مكون سديمي في حركة النظام الشمسي، فذلك راجع إلى كون هؤلاء العلماء قاموا بعزل باقي المكونات الأخرى. لنقمْ للحظة بإطلالة على هذا التاريخ لأنه مفيد لنا.

ينجم مدار كوكب مثل الأرض عن اجتماع عدة حركات تتم وفق مقاييس زمنية مختلفة، حيث تنبثق أول حركة من جاذبية الشمس. ولو كان النظام الشمسي يتضمن كوكب الأرض وحده، لاتَّبع هذا الكوكب إلى ما لا نهاية المدار الإهليْلجي نفسه بحسب القوانين الثلاثة لكيبلر التي سيتم التأكد من صحتها بدقة. بالتالي، سيظل ميلان الأرض (أي الزاوية التي يكونها محور دورانها مع مستوى المدار) ثابتاً أيضاً. طبعاً، فإن المقياس الزمني يتمثل هنا في السنة، وهو الزمن الذي تستغرقه الأرض في إكمال دورتها. إلى جانب هذه الحركة الأولى، هناك حركات أخرى تعتبر جميعُها

دورية وتنتج عن جاذبية كواكب أخرى وعن جاذبية القمر. ولا تغير هذه الأفلاك، على طول السنة، الحركة الأولى التي تتم بشكل إهليلجي. لكن على مستوى أطول، يمتد من قرن إلى مليون سنة، فإنها تغير هذا الشكل الإهليلجي وكذلك ميلان الأرض، حيث يبدو وكأن هذه الأخيرة تسير فوق سكة حديدية، في الوقت الذي تنتقل فيه الأفلاك المذكورة.

لقد شكل هذا التحول البطيء للحركة الإهليلجية الأساسية، المقترنة بتصور كيبلر للحركة، موضوع اشتغال علماء الفلك منذ نيوتن، لأنه سمح بإبراز التفاوت الملاحظ بين توقعات نظرية كيبلر والملاحظات المتراكمة منذ قرون. وعلى سبيل المثال، اكتشف لابلاس ما بين سنتي 1785 و 1788، من خلال معادلات حركة المشتري وعطارد، حداً يعود إلى الجاذبية المتبادلة بين الكوكبين على فترة 900 سنة تقريباً، مما سمح له بوضع توقعات نظرية متلائمة مع الملاحظات (حول تقابل المشتري وعطارد) التي امتدت من سنة 240 قبل الميلاد إلى سنة 1715، أي حوالي ألفي سنة. فهل سيضاف نمط ثالث للحركة إلى النمطين الآخرين، وهل سيظهر تأثيره على مقياس أطول يناهز 100 مليون سنة؟

إن الطرق الرياضية التي استخدمها لابلاس أو لوفيريي لم تسمح لهما بالإجابة على هذا السؤال؛ فلم يكن باستطاعتهما الكشف ببراعة عن الحركات الدورية أو الانحرافات الثابتة. لكن، من بين المكتسبات الرئيسة لهذه النظرية الإقرار بعدم وجود انحراف ثابت يمكنه مثلاً أن يؤدي بالأرض إلى الابتعاد أو الاقتراب من الشمس، ببطء وبكل تأكيد، مع النتائج المترتبة عن ذلك. ففي إطار هذا المقياس الزمني الذي قد يصل كما أشرنا إلى ذلك، إلى مليون سنة، تكون الانحرافات الوحيدة والممكنة للمدار دورية، أي أن الأرض تمر بالمواقع نفسها على مدى زمن طويل إلى حد ما. ونحن نعلم اليوم بأن حركة الصنف الثالث هذه موجودة. وبيانه أن النظام الشمسي يكون مستقراً ومنتظماً بمقياس مليون سنة، لكنه يصبح سديمياً بمقياس 100 مليون سنة. وبفضل تقدم البحوث الرياضية لبوانكاري وكولموغروف، وأيضاً بفضل تقدم تقنيات الحساب، أصبحنا ننظر إلى المسألة أبعد من لابلاس أو لوفيريي. لكن، وحسب قولة العالم والفيلسوف الفرنسي باسكال Pascal، إذا كنا نرى أبعد منهما فالفضل يرجع إليهما، لأننا مثل الأقزام المرفوعين فوق أكتاف العمالقة. فإن

السَّديم لا يتجلى في النظام الشمسي إلا إذا ما استنبطناه من الحركات الدورية التي تعرفا عليها ورتباها بعناية. كما أن الحسابات الدقيقة التي أظهرته، استثمرت الحسابات التي أجرياها منذ قرابة قرْنين.

على سبيل المثال، عندما أراد لاسكار متابعة مسار الكواكب على مدى مليارات السنوات، بدأ باستخدام التقنيات الرياضية التي طورها كل من لابلاس ولوفيريي وبوانكاري، لتبسيط مشكلته، وذلك عبر إرجاعها إلى نظام من المعادلات لا يتضمن «سوى» 150 ألف حد، مما مكّنه من حلّها في بضع ساعات مستعملاً آلة حسابية دقيقة.

هكذا حصل تقدم كبير منذ أربعة قرون، وما زال هذا التقدم مستمراً. والأمر المثير هو أننا نرى كيف تطورت رؤيتنا للعالم خلال هذه الفترة، حيث تمكنت الفلسفة والثقافة تدريجياً من استيعاب تقدم العلم، كما أن العلاقات بين المجتمع ومعرفته لم تتبع اتجاهاً واحداً. لقد فرض كيبلر، بإعلانه عن كون مدارات الكواكب إهليلجية، صورة عالم بسيط ومستقر وشفاف أمام أعيننا منذ بداية الكون إلى نهايته. وقد سعى نيوتن وتابعوه من العلماء حتى أينشتاين، إلى تأكيد هذه

الصورة؛ وبذلك فهم لن يتقبلوا المزيد من تدقيقها. والحال، أن من الصعب علينا أن نجعل من المخطط الإجمالي الذي رسمه كيبلر لوحة مكتملة. إننا كلما دقَّقنا في التفاصيل أصبح العمل شاقاً؛ ذلك أن صورة العالم، كما قدمتها الميكانيكا الكلاسيكية، هي صورة ساعة حائطية يحدث الخلل تدريجياً في حركتها. وقد اعتبر نيوتن نفسه بأن الساعاتي مطالب بالتدخل في كل مرة لضبط هذه الحركة. ومع بوانكاري وكولموغروف تغيرت الوضعية، إذ أقرّ هذان العالمان الرياضيان بكون السَّديم يشكل جزءاً لا يتجزأ من حركات الكواكب، وبكون النظام الشمسي غير مستقر. والآن، ها قد مر قرن على الأعمال الأولى لبوانكاري بخصوص هذا الموضوع، ونصف قرن على أعمال كولموغروف؛ وكان من اللازم انتظار كل هذه المدة لكي يتجاوز هذا التصور الجديد للعالم الدوائر العلمية المحدودة. ولربما وجب علينا انتظار المزيد من الوقت، كي يكتسب التصور المذكور الشعبية نفسها التي يحظى بها تصور كيبلر في الوقت الحالي.

علم الأرصاد الجوية: لورنز Lorenz

لنعدْ مرة أخرى إلى كوكبنا، حيث سنكون أمام وضعية أعقد. فالنظام الشمسي بسيط جداً، لأنه يتضمن مكونات قليلة (هي الشمس والكواكب) ويخضع لقانون واحد هو قانون الجاذبية. طبعاً، يمكننا بمزيد من التدقيق إضفاء أشياء أخرى (مثل الكواكب التابعة والنيازك والمذنَّبات والغبار)، وأيضاً بعض أنواع التفاعل (الإشعاعات والاصطدام)، لكن تظل الصورة الأساسية هي التي ذكرنا في البداية.

بالمقابل، تُعتبر الأرض بمثابة نظام معقد جداً تتداخل فيه الظواهر الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية والاجتماعية. ونجد خير مثال على ذلك في علم الأرصاد الجوية. فعلى ما يبدو، تتوقف حالة الطقس على عدد كبير من العوامل. وإذا ما أردنا مثلاً توقُّع هذه الحالة بفرنسا في الأيام الخمسة المقبلة، فعلينا معرفة الظروف المناخية بالمحيط الهادي. لهذا، علينا أن نأخذ بعين الاعتبار درجة الحرارة والضغط الجوي وقياس الرطوبة الجوية hygrométrie بالتربة وبالمرتفعات وفي كل بقاع العالم وشعاع الشمس، وبالتالي طبقة الأوزون والتضاريس والمحيطات التي ما زالت أحوالها، بالسطح

كما بالعمق، تتَّسم بالغموض. ترتبط هذه المتغيرات كلها بعلاقات فيزيائية، يُعبَّر عنها بمعادلات رياضية مثل قانون ماريوط Loi de Mariotte : $PV = RT$، الذي يربط بين الضغط P ودرجة الحرارة T وحجم الغاز V؛ ومعادلات نافيي–ستوك Navier – Stokes التي تضبط سريان السوائل القابلة للضغط (الهواء)، أو غير القابلة للضغط (الماء)، وغيرها من المعادلات. ومن الطبيعي أن تكون معالجة هذه المعلومات كلها صعبة وأن يكون علماء الأرصاد الجوية من بين أكبر مستخدمي الحساب.

ومع ذلك، سيكون من الخطأ إرجاع صعوبة توقّع أحوال الطقس، بشكل حصري، إلى تعدد المتغيرات وتعقد المعادلات. ففي تجربة شهيرة، نجح عالم الأرصاد الجوية إدوارد لورنز E. Lorenz في بناء نموذج مختصر جداً، يقوم على 12 عاملاً فقط ويتوافر على خاصية اللاتوقع، مثله مثلُ النموذج الكامل. لن نفصِّل القول في نموذج لورنز، بل سنكتفي بالإشارة إلى أنه سيختار من بين المتغيرات الجوية 12 متغيراً تكتسي أهمية خاصة، وسيحدد تطورها من خلال 12 معادلة بسيطة تعكس، بشكل عام، بعض الخصائص الرئيسة للنظام الكامل.

لقد كان هذا النموذج مختصراً جداً، لذلك صعُب

استخدامه للقيام بتوقعات تخص أحوال الطقس، غير أن فائدته تمثلت في كونه غير مكلِف أثناء فترة حسابه، أي في سنة 1960، وفي قابليته للاصطناع الرقمي. هكذا أصبح من الممكن، عبر تنويع الشروط البدئية، (أي القيم المنبثقة من المتغيرات الاثني عشر المحتفظ بها)، الحصول على سلسلة من «أحوال الطقس» المختلفة، وبالتالي التوافُر على علم أرصاد جوية تجريبي. أما الفائدة الأخرى، فتتمثل في إمكانية تسريع وتيرة أحوال الطقس. ففي كل دقيقة، تصدر عن الحاسوب لائحة من 12 رقماً، تلخص للملاحظ المتمرس حالة طقس اليوم، أي النشرة الجوية.

وبإمكاننا، إذا لم يحصل عطل بالحاسوب، الحصول في ظرف ست ساعات على معلومات تتعلق بأحوال طقس السنة بكاملها. وأول ما سيرضي لورنز هو كون نموذجه مقبولاً رغم خاصيته الاختزالية، ذلك أن الأرصاد الجوية التي اصطنعها شبيهة بالأرصاد الجوية الطبيعية. فهي تنتظم أيضاً وفْق حركات الأعاصير ومراكز الضغط الجوي المرتفع، حيث نشاهد ميلاد الاضطرابات ونهايتها واستقرار الجبهات وانتقالها. والملاحظ بهذا الخصوص أن مهنة عالم الأرصاد الجوية

لم تكن، في العالم الاصطناعي للورنز، أسهل مما هو عليه الحال في الواقع. ففي الحاليْن معاً، كان الطقس متقلباً وكانت السنوات تتوالى من دون أن تتشابه، وكانت التوقعات تخضع للتكذيب في غضون بضعة أيام.

لكن هذا الأمر يثير بعض الشكوك؛ ففي حالة علم الأرصاد الجوية، لا ترتبط الصدفة بتعدد العوامل أو بتنوع الأسباب، ما دامت حالة الطقس غير متوقعة، بالرغم من التخفيض الصارم من عدد المتغيرات. وهناك أمر أكثر إثارة، وهو أن الشروط البدئية نفسها تؤدي إلى تطورات مختلفة. ذلك ما بيَّنته تجربة لورنز الذي قرر تمديد فترة الملاحظات، التي أجراها في يوم سابق، إلى يوم آخر لاحق حيث لم يشرع في التجربة من البداية، بل من وسطها. هكذا، قام بنقل حالة النظام في نصف المسار، أي أنه نقل الأرقام الاثني عشر الموجودة باللائحة خلال عملية الحساب، وأدرجها من جديد في الحاسوب وكأنها حالة بدئية لتطور جديد. طبعاً، فهو توقَّع ملاحظة النصف الثاني من العملية، حيث يتوقَّف الحساب الأول وعمل الحساب الثاني على إكمال النتائج المحصل عليها. ولدهشته الكبيرة، لم يؤد الحساب الثاني إلى تكرار نتائج الحساب الأول، بل انفصل عنه بسرعة.

ففي البداية، كانت النتائج متشابهة، لكنها اختلفت بالتدريج. وبعد مرور ما يعادل شهراً من الزمان، لم تعد هناك أي علاقة بين التطور الأول والثاني؛ وكأن صانع كوكبيْن متشابهين في كل شيء، بالفراشات نفسها التي تطير بالأمكنة نفسها وبالأوراق التي تسقط نفسها من الأشجار نفسها بفعل الرياح نفسها، سيجد إثر زيارته لهما بعد شهر من صنعهما، بأن المطر يسقط بأحدهما وبأن الشمس تشرق بالآخر.

وبطريقة أقل شاعرية نقول إن نتيجة الحساب لا تتوقف على الشخص الذي ينجزه ولا على فترة إنجازه. والحال، أن نموذج لورنز يصطنع التطور بواسطة الحساب : فطقس اليوم تم حسابه انطلاقاً من طقس البارحة، وإذا ما أعدنا هذا الأخير بدقة، كما فعل لورنز عبر إدراج الأرقام الاثني عشر التي تمثّلها بالحاسوب، فيجب أن نحصل بالضبط على طقس اليوم والغد وبعد غد. لكن الحاسوب لم يصل إلى هذه النتيجة، وكأن الرياضيات قد تغيرت منذ الأمس.

ستتجلى عبقرية لورنز في التعرف على نظام سديمي فاعل، في الوقت الذي لم تكن فيه الكلمة قد ابتكرت بعد. هكذا، سيذكّر بأن الحواسيب تختلف عن عقول

الرياضيين، فهي لا تحتفظ بجميع عشريات الأعداد التي تستخدمها. ونظراً لطبيعة المكان المخصَّص لتخزينها بالذاكرة، ولكي يتم الحدُّ من تعقد العمليات، يضطر الرياضيون إلى جبر الأعداد بحيث يشتغلون بأرقام محددة قبلياً، وهي أرقام دالة (لا تُحتسب فيها الأصفار). هكذا احتفظت الآلة التي استعملها لورنز بستة أرقام، أي أن π=3,14159 .بالمقابل، فهي لم تطبع سوى ثلاثة أرقام لتقتصد في الحيز المكاني، أي أن القيمة التي تقرؤها على اللائحة هي $\pi = 3,14$. هكذا، فإن المعطيات التي نقلها لورنز، والتي شكلت أساس الحساب الثاني، لم تكن هي بالضبط المعطيات التي سجلها الحاسوب بذاكرته وتم استعمالها في الحساب الأول.

طبعاً، لم يكن الاختلاف كبيراً، لأنه تعلق بالرقم الدال الرابع، أي أن الخطأ أقل من واحد على ألف؛ لكنه كاف ليُستغل من طرف آلية التكبير، بحيث نصل بعد فترة معينة إلى انحرافات كثيرة. ولا أحد يجادل اليوم في كون علم الأرصاد الجوية هو بمثابة نظام سديمي، بل إن هذا هو السبب الرئيس الذي يجعل من المستحيل القيام بتوقعات على المدى البعيد. إننا نعتبر بأن اضطراباً صغيراً قد يتضاعف خلال يومين، مما يعني

أنه سيكبر بمعامل ألف خلال عشرة أيام وبمعامل مليار خلال شهر، إلى أن يبلغ مستوى بادياً للعيان. وهو ما ندعوه في العادة بتأثير الفراشة. فرفرفة جناحي الفراشة بمرعى جبلي تصبح تياراً هوائياً، يتحول بدوره إلى نسيم ثم إلى إعصار يغرق مركباً بخليج المكسيك.

خلاصة القول، لكي نتوقع حالة الطقس في الشهر أو الشهرين المقبلين، علينا أن نعرف كل رفرفة أجنحة كل فراشات العالم. لكن هذا أمر غير صحيح؛ فنموذج لورنز الذي كان يتوافر على 12 متغيراً فقط، عرض الاضطراب نفسه. لهذا سيكون من الأفضل القول إنه من بين العدد الهائل من الفراشات التي تطير بالحقول والغابات، توجد فراشة واحدة مهمة ويمكن معرفتها. لكن علينا معرفة وضعيتها ورفرفة جناحيها بدقة تتجاوز الواقع بحيث لن تعود لها أية دلالة طبيعية. ولفهم هذا الأمر الدقيق، يُستحسن الاستشهاد بمقطع من كتاب صدر منذ قرن بعنوان «العلم والمنهج»، وهو من تأليف العالم الرياضي الكبير هنري بوانكاري الذي سنعود إليه لاحقاً. يقول هذا الأخير: «لماذا يجد علماء الأرصاد الجوية صعوبة في توقع أحوال الطقس بشكل يقيني؟ ولماذا تبدو لنا الأمطار والعواصف

نفسها وكأنها حادثة بالصدفة، بحيث يعتبر العديد من الناس أن من الطبيعي إقامة صلاة الاستسقاء أو لكي يتحسن الجو، في حين يتم اعتبار إقامة الصلاة من أجل حصول الكسوف أمراً مثيراً للسخرية؟ نحن نرى بأن الاضطرابات الجوية الكبرى تحصل عموماً في المناطق التي يكون فيها المناخ متقلباً. ويلاحظ علماء الأرصاد الجوية هذا التقلب، كما يعتبرون بأن إعصاراً سيحدث في مكان ما من دون تحديده بالضبط. من الممكن أن يمر هنا أو هناك، بفعل زيادة أو نقصان عُشْر الدرجة في منطقة معينة، بحيث يمتد دماره إلى أماكن كانت ستنجو من تأثيره. هكذا، كنا سنتوقع مرور الإعصار لو أننا عرفنا عشر الدرجة هذا، لكن ملاحظاتنا لم تكن صارمة ولا دقيقة بما فيه الكفاية، لذلك يبدو كل شيء وكأنه وليد الصدفة. وهنا أيضاً نجد التناقض نفسه بين السبب الضئيل الذي لا يعيره الملاحظ أي اهتمام والتأثيرات الهائلة التي تكون أحياناً عبارة عن دمار مرعب». ما الذي نستخلصه من هذا النص؟ أولاً أن الرياضيين كانوا يجيدون الكتابة في تلك الفترة. ثانياً أن بوانكاري كان عبقرياً سابقاً على زمانه؛ ولا أعتقد أن علماء الأرصاد الجوية المعاصرين له كانوا متفقين

معه. ومن هذا المنظور، يشكل ظهور الحواسيب مكسباً لا يقدَّر بثمن، لأنه يسمح بتكرار التجارب الرقمية (وهو ما نسميه بالاصطناع) وضبط واقع الأنظمة السَّديمية بأقل كلفة، وهو الواقع الذي لم يكن في متناول العمليات الحسابية، زمن بوانكاري.

ومع ذلك يمكننا أن نضيف الملاحظة التالية، وهي أن التقلب الذي تحدَّث عنه والذي لا يسمح بالتوقع على المدى البعيد، غير موزَّع بشكل نمطي على كل المتغيرات المتدخلة في علم الأرصاد الجوية. فالنظام التام يتضمن أنظمة فرعية أبسط من 12 متغيراً تمثل التقلب نفسه (وسنرى لاحقاً كيف يمكن اختزالها في 3 متغيرات فقط). ويفتح هذا الأمر سُبُلاً لم يتمكن بوانكاري (ربما) من رؤيتها. صحيح أن التمييز التام لحالة الطقس الأرضي في لحظة معينة يقتضي تدقيق قيمة عدد هائل من المتغيرات. لكن هذه الأخيرة ليست جميعها مستقلة، أو على الأقل فهي لن تبقى مستقلة لمدة طويلة. فمن غير الواقعي مثلاً افتراض أن الضغط الجوي على الأرض، المنبثق من نقطتين تفصل بينهما مسافة كيلومتر واحد، يمكن أن يبلغ اختلافه 100 مليبار (والمليبار millibar وحدة لقياس الضغط الجوي تساوي

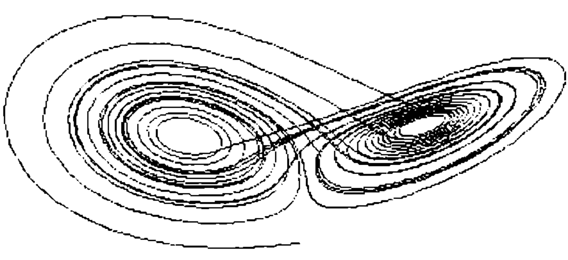
جزءاً من ألف من البار) أو عشر درجات. وفي حالة ما إذا حصل هذا الأمر بشكل طارئ فإننا سنكون على يقين بأن الوضعية ستعود بسرعة إلى حالتها الطبيعية، لأن دوران الهواء يتكلف بإعادة ما يشبه التوازن محلياً. هكذا، يخلق التوازن الطبيعي للنظام روابط بين مختلف المتغيِّرات التي تصفه ويقلص عدد المتغيرات المستقلة حقيقة. والحال أن وصف حالة مناخية اعتباطية، مثل سقوط الثلج بمدينة باماكو الإفريقية أو بلوغ درجة الحرارة بمنطقة أديليا Adélie (بالقطب الجنوبي) ثلاثين درجة مئوية في الظل، يقتضي تحديد قيم 100 ألف أو مليون أو 10 ملايين متغير؛ بالمقابل، فإن وصف حالة واقعية يحققها المناخ من دون تدخل خارجي يتطلب متغيرات أقل.

لقد اختزل لورنز هذه المتغيرات في 12 متغيراً كما أسلفنا، لكنه لم يكن يبحث عن تمثيل أمين للتحرك الجوي (أي لتحرك طبقات الهواء)، بل كان يريد بناء نموذج مختصر فقط. وينبغي الحفاظ بكل تأكيد على متغيرات أكثر، إذا ما كنا نرغب في إنجاز نموذج واقعي؛ ولربما بلغ عددها مائة أو ألفاً. ولا يهم الرقم المضبوط هنا، ما دام الأمر الأساسي هو معرفة أن التطور الطبيعي

للنظام ينحو باتجاه حالات خاصة جداً يقتضي وصفها الكامل متغيرات أقل من تلك التي تتطلبها الحالات الاعتباطية تماماً، أي التي لا تتحقق طبيعياً، اللهم بشكل عرَضي.

ثمةَ نموذج آخر أنجزه لورنز سنة 1963، يبرز بشكل أفضل آلية اختزال عدد المتغيرات. وهو نظام جديد من ثلاثة متغيرات تنظمها ثلاثة معادلات تفاضلية équations différentielles. وكيفما كانت نقطة الانطلاق، فإن مدارات هذا النظام تلتف حتماً حول شيء عجيب يرتسم تدريجياً ويحمل اسم جاذب لورنز attracteur de Lorenz. ومن الصعب وصف الانبهار الذي يصيب المرء عندما يتبدّى له هذا الشكل الغريب تدريجياً على الحاسوب؛ وأنا أدعو القارئ إلى زيارة المواقع الإلكترونية التفاعلية العديدة المخصصة له. ويقدم لنا الشكل التالي مرحلة وسيطة في مساره، حيث يمثل النظام نفسه أو بالأحرى حالته في لحظة معينة، بنقطة في الفضاء الاعتيادي المحدد في ثلاثة أبعاد، بحيث تمنح الإحداثيات الثلاثة لهذه النقطة قيم المتغيرات الثلاثة الوصفية في اللحظة المعنية. وعند اختيار النقطة البدئية يتم تحديد تطور النظام برمّته

بواسطة معادلات لورنز، بحيث يمثل الرسم المدار الملائم. هكذا نراه يلتفُّ بشكل تعاقبي حول جُويْن anse ثم حول آخر، ومن جديد حول الأول ثم الذي يليه، إلى ما لا نهاية وعن طريق الصدفة، من دون أن يتمكن الملاحظ من توقع عدد الدورات التي يقوم بها المدار داخل جهة معينة، واللحظة التي ينتقل فيها إلى الجهة الأخرى.



جاذب لورنز : يبدو لنا شكل السرج المميز لجاذب لورنز المكون من جزءين، يوجد أحدهما على اليمين والآخر على اليسار. وتم تمثيل مدار واحد يمر من جزء إلى آخر ويقوم بثلاث دورات (علماً بأن عددها بالضبط يتغير بشكل كبير)، ثم يبتعد. ولا يمكن لشكل واحد أن يصف الاهتزازات غير المنتظمة، لذلك يُنصح بمشاهدة الحركة بالمواقع الإلكترونية المخصصة لهذا الجاذب. لكن ما لا يستطيع الحاسوب أن يظهره، هو كون الجزءين المذكورين يتشكلان من ورقة واحدة مطوية بشكل بالغ التعقيد. إنه فعلاً جاذب غريب!

إننا نلاحظ هنا وجود تشابه تام مع حركة دولاب الطاحونة الناجمة عن سقوط حبات الرمل، مع ميزة إضافية وهي التوافر على نموذج رياضي بسيط. وقد سجلنا في هذه الحالة أهمية وضعيات التوازن، حيث يتردد الدولاب الثابت والمملوء من الجهتين، بشكل متساوٍ تقريباً، بين الميل إلى هذا الاتجاه أو ذاك. وهنا يتجلى تأثير الصدفة، لأن حبة رمل واحدة ستكون كافية لترجيح كفة الحركة في اتجاه معين بدل آخر. ونحن نجد هذا النوع من الوضعيات في جاذب لورنز؛ فالمنطقة الوسطى التي يتقاطع فيها الجويْنان هي عبارة عن مفترق طرق يتجه بعضها يساراً والآخر يميناً. وتتداخل هذه الطرق في ما بينها وتشكل شبكة يتعذر حلها، إلى درجة أن الاختلاف غير البادي عند بلوغ هذه المنطقة يجعلنا نختار طريقاً بدل آخر ونتجه صوب اليسار بدل اليمين.

وبما أن نموذج لورنز يتطلب فقط ثلاثة متغيرات تفسيرية، فإنه يسمح بإبراز عمل النظام السَّديمي بوصفه مدار نقطة في فضاء ذي ثلاثة أبعاد. وهنا أيضاً تسهم عمليات الحساب والتمثيل البياني التي تقدمها الحواسيب الحديثة في جعل هذه التجربة رهن إشارة

الجميع؛ وهذا بكل تأكيد هو أحد المشاهد الأكثر إثارة التي يمكن للرياضيات عرضها.

هكذا ندرج معادلات الحركة في الآلة ونحدد نقطة الانطلاق ثم نبحر. ومن خلال هذه النقطة وحدها، يتبلْور مدار فيرسم داخل الفضاء الفارغ، ومن خلال حركاته الحلزونية، شكلاً مكوناً من جوينيْن، هو الجاذب الغريب الذي لا يشبه الأشياء التي نعرفها؛ بمعنى أنه غريب تماماً عن الأشكال الكلاسيكية للهندسة الفراغية، مثل السطح والمكعب أو الدائرة وكل الموضوعات الممتلئة والصقيلة. ويبدو أن الشكل المذكور مكون من فجوات وزوايا، وكأنه غريب عن فضائنا ذي الأبعاد الثلاثة، بحيث يصعب عليه التموْقع بداخله.

بيْد أننا نستبق الأمور بعض الشيء، فالبنية الخاصة لجاذب لورنز وهندسته غير الأرضية تعرفان من أول نظرة وأول تأمل؛ وهنا سنحتاج للحاسوب مرة أخرى وسنشرع في تغيير الوضعية البدئية. فإذا ما اتخذنا نقطة انطلاق جديدة، بعيدة أو قريبة من النقطة القديمة، فإننا سنحصل على مدار مختلف تماماً، لأن النظام سديمي. هكذا ينفصل المداران على الفور ويتحرك كل واحد

باستقلال عن الآخر، بحيث نجد الواحد في الجهة اليسرى من المكان والآخر في الجهة اليمنى؛ بعد ذلك يحصل التقاء مؤقت بينهما قبل أن ينفصلا من جديد. وعلى مدى حركتهما، يمران بالأمكنة نفسها لكن خلال أوقات متباينة جداً. هكذا يقوم كل مدار برسم ذلك الشكل الغريب المؤلف من جوينيْن، في الفضاء المحيط، وكأن نحاتين يعرضان أمامنا، عبر اشتغالهما على كتلتين مختلفتين من الرخام، تمثال داوود الشاب نفسه ملوحاً بمقلاعه في الهواء. وهذا هو السبب في كون الشيء المحدود، الناتج عن الأداة التي يستعملها هذان النحاتان المتخفيان، سيأخذ اسم الجاذب. إنه يجذب جميع المدارات كيفما كانت نقطة انطلاقها، إذ تتجه هذه الأخيرة حتماً صوب منطقة ضيقة في المكان الذي يتضمن الجاذب، كما أن تطوراتها لا تخرج عن إطاره. ويتجلى لنا هنا الاختلاف بين الحالة الاعتباطية للنظام والحالة الواقعية التي حاولنا تعريفها، بخصوص علم الأرصاد الجوية. ففي الوقت الذي تمثل فيه كل نقطة داخل مكان ثلاثي الأبعاد حالة ممكنة نظرياً، فإن بعض النقط هي التي تكون «طبيعية»، أي أن التطور الطبيعي للنظام يمكن أن يؤدي إلى هذه الحالة. وتحتل الحالات

الطبيعية حيزاً محدوداً في المكان، وهو الحيز الذي يمثله جاذب لورنز. أما باقي الحالات فهي عابرة، بمعنى أننا إذا جلبنا النظام إلى الحالة المذكورة، عندما يتحرر ويتبع مجراه الطبيعي، فإنه يبتعد عنها فوراً ولن يعود إليها أبداً. فأثناء الدوران، يجد النظام نفسه حتماً في الجاذب، أي ضمن حالة طبيعية. وهو لا يكون ثابتاً، بل على العكس، يتابع بشكل لامتناهٍ حركة الدوران، تارة على اليسار وتارة على اليمين، وهي الحركة التي تسمح له باكتشاف الجاذب برمته، أي بالكشف عن الحالات الطبيعية كلها. من ثَمّ، فإن وجود الجاذب يعبر عن تمييز أساسي قائم بين أغلب الوضعيات التي لن يمر النظام عبرها أبداً من تلقاء ذاته، وبعض الوضعيات الطبيعية التي يمر منها دوماً، وإن بشكل غير منتظم.

ما كان علينا أن نبيّنه لبوانكاري هو لعبة الصدفة والضرورة؛ إذ كيفما كان منطلق المدارات، فإنها تصل حتماً إلى الجاذب ولا تغادره. فالحركة لا تكتشف سوى الجزء الصغير نفسه من المكان الموضوع تحت تصرفها. بذلك، يُعتبر محرك لورنز بمثابة توضيح للضرورة وتمثيل هندسي لها. وسيعمل النظام باستمرار على اللحاق به، لكن بعد بلوغه يتذكر هذا النظام وضعه السَّديمي، وهنا

تصبح الغلبة للصدفة. بهذا المقتضى، تشتغل آلية تكبير الفوارق الصغيرة وتصبح الحركة احتمالية بفعل الطرق التي سبق وصفها. طبعاً، فإن المدارات تظل منحصرة داخل الجاذب، لكنها تنفصل بعضها عن بعض رغم تقارب نقط انطلاقها. كما تتناوب حركاتها من اليسار إلى اليمين ومن هذا الجويْن إلى ذاك، بطريقة غير منتظمة وغير متوقعة، ما دامت قاعدة التتالي الوحيدة هي عدم وجود قاعدة. هكذا، يكتشف كل مدار المكان الموضوع كلية تحت تصرفه، أي مساحة الجاذب، حيث تدفعه تعرجاته في الأخير إلى المرور بكل مكان وباستمرار. وبذلك، سنكون متيقّنين بأن كل مدار سيمر بأي نقطة من نقط الجاذب، في وقت خاص به وحسب الموقع الذي انطلق منه، بدون توقف وبشكل غير منتظم، لكنه مؤكد على الدوام.

كان بإمكاننا أيضاً أن نوضح لبوانكاري بنية جاذب لورنز؛ ويعتبر الحاسوب بهذا الخصوص أداة لا غنى عنها. فالجاذب هو شيء محدود قد يرسم كل مدار من المدارات، بغض النظر عن نوعيته، على شرط أن يستمر في تحركه إلى ما لانهاية. وما نراه على شاشة الحاسوب هو مجرد رسم، يزداد دقة كلما اشتغل عليه الحاسوب

مدة أطول؛ فهو بمثابة مرحلة وسيطة، تقترب أكثر فأكثر من النتيجة النهائية كلما عبرت المسافة التي يقطعها المدار. ويمكننا أن نحصل بسهولة على تكبير لهذا الجزء أو ذاك أو للمقاطع المستعرِضة للجاذب، ويكفي أن ننتظر مرور المدار بالمجال الذي يهمنا، أو عبوره لمستوى المقطع الذي اخترناه. فالمسألة هي في الأساس مسألة وقت (إذ كلما كانت المنطقة المختارة صغيرة، كلما استغرق المدار وقتاً أطول للعودة إليها) ؛ لكن الحواسيب التي نتوافر عليها حالياً، تسهل المهمة. لهذا، يمكننا بكل بساطة، مضاعفة التقطيعات واكتشاف مكونات الجاذب.

وما يثير بهذا الخصوص هو انسجام الجاذب، فهو يتوافر على بنية مكونة من طبقات رقيقة متماثلة على كل المستويات. ولفهم ذلك، علينا أن نتخيل مثلاً كتاباً مجلداً من ألف ورقة مطبوعة (أي مرقمة)، ولكن بالظهر فقط. ولنتخيلْ أيضاً أن رياضياً مجنوناً نزع كل الأوراق، باستثناء تلك التي تحمل أعداداً فردية مثل: 1، 3، 5، 7 أو 9. هكذا سيبقي على الورقة رقم 713 وسينزع الأوراق 613، 723 و 714. ويجب عدم المساس بتسفير الكتاب، بحيث تترك كل ورقة ناقصة مكاناً شاغراً. سيبدو

الكتاب الذي بقي بين أيدينا غريباً. فهو يتضمن عدداً محدَّداً من الأوراق (155 ورقة إذا لم أكن مخطئاً)، لكنها موزعة بدون انتظام. وعلى سبيل المثال، هناك 5 أوراق متتالية ما بين الرقمين 711 و 719، في حين توجد فجوة من 11 ورقة بين رقمي 719 و 731. أما بعد الرقم 199، فإن الفجوة تتسع لتشمل 111 ورقة قبل بلوغ رقم 311. هكذا، ستتموْقع النتيجة بين الكتاب والورقة، لأن ما تبقى ليس هذا ولا تلك، فهو ليس كتاباً لأنه فقد أوراقاً عديدة، وهو ليس ورقة لأنه يتوافر على العديد منها؛ لنقل إنه شبه كتاب.

لنتابعْ هذا العمل الهدّام ولنتخيلْ بأن الكتاب أكبر حجماً، أو بالأحرى لنتخيل بأنه في حجم الكتاب السابق، ولكنه يتوافر على أوراق أرقّ، وبدل أن يكون العدد ألفاً سيصبح 10 آلاف. ولنقم الآن بنزع الأوراق وفق المبدأ نفسه. فما نقوم به شبيه بعمل المدار الذي قدم في كل دوْرة تدقيقات جديدة توضح الصورة السابقة أكثر وتوضح جاذب لورنز بشكل أفضل.

وبالنسبة للصورة السابقة، أي صورة الكتاب المتضمن لعشرة آلاف ورقة والذي يشغل حجم الكتاب نفسه المتضمن لألف ورقة، فإن التغيرات ستكون كما

يلي: ستبقى 830 ورقة من بين العشرة آلاف، في حين أن عدد الأوراق المتبقية من الكتاب الأول هو 155. طبعاً سيكون العدد أكبر وسيسمح بالتوافر على معلومات أكثر، كما أن شبه الكتاب هذا سيتميز عن الكتاب الكامل وعن الورقة. ومع ذلك، فإن الحجم الذي تشغله الأوراق المتبقية من 10 آلاف أقل من الحجم الذي تشغله الأوراق المتبقية من ألف، حيث نزلت النسبة من 155/1000 أي 15,5 ٪ إلى 830/10000 أي 8,3 ٪. فكل ورقة قديمة تتحول إلى 10 أوراق جديدة. لهذا، فإن موقع الورقة رقم 711 (القديمة) أصبحت تحتله 10 أوراق مرقّمة من 7110 إلى 7119 (جديدة). يبرز هذا التدقيق فجوات جديدة، فهناك حيث كنت أتصفّح الورقة رقم 711، أصبحت أرى صحيفة من 5 أوراق وأرقامها هي: 7111، 7113، 7115، 7117 و 7119، توجد بينها أربع فجوات. إن الدقة التي أحرزنا عليها هنا أظهرت فجوات عديدة لم يظهرها الفحص الأول. وقد ظلت الفجوات الكبرى والصغرى التي اكتشفنا في المرحلة السابقة شاغرة، وأصبح المجال بين الورقتين 719 و731 (بالكتاب الأول) ممتداً بين الورقتين 7199 و7311 (بالكتاب الثاني). وبذلك حافظ الكتاب على حجمه،

لأن الأوراق الجديدة أرق من القديمة بعشر مرات.

يمكننا أن نستمر في العملية بزيادة التدقيق كل مرة، أي بالاشتغال على كتب تتضمن أوراقاً أرق. وأترك للقارئ فرصة تخيُّل ما يمكن أن يحصل عليه من شبه كتاب بأوراق لامتناهية في رقتها ولا يحيط بها الإحصاء وتتوافر على حجم يعادل حجم الكتب السابقة. ذلك أن هذه الأوراق تتوزع بشكل مليء بالفجوات، لكنها متجانسة على كل المستويات، باعتبارها ورقات ذات أحجام متنوعة، تفصل بينها فضاءات فارغة.

وللإمعان في إدهاش القارئ، لم يبق لي سوى أن أذكِّره بأن نوع المدار يكتشف مساحة الجاذب برمتها. وفي الواقع، فإن هذه الأوراق كلها تشكل الورقة نفسها التي تختفي ثناياها داخل جلد الكتاب. فليتصور القارئ إذاً نقطة تخترق الجلد من خلال الورقة رقم 7111 (مع العلم أن شبه الكتاب هذا، يتضمن ما لا حصر له من الأوراق، بحيث إن ترقيمها يقتضي ما لانهاية له من الأعداد الفردية بطبيعة الحال) ثم تظهر بالورقة رقم 3917 وتمر بهذه الأخيرة وتخترق الجلد من جديد وتخرج من مكان آخر، وهكذا إلى أن تعبر الكتاب برمته. إننا نعتقد بأنه سيفهم لماذا أعطينا لهذا

الصنف من الأشياء اسم الجاذب الغريب (وطبعاً، فإن هذه الأشياء تظهر على مستوى نظرية السَّديم برمتها، وليس فقط في حالة نظام لورنز).

هوامش

1. يتعلق الأمر بقانون الجاذبية الشهير الذي يقوم فيه جسم بكتلة M وعلى مسافة r من جسم آخر بكتلة m، بجذب هذا الأخير بقوة gmM/r^2 بحيث تعتبر g ثابتاً كونياً. وقد برهن نيوتن على أنه إذا كان الكوكب يدور وحده حول الشمس، فإن حركته ستكون إهليلجية.

كيف يبني المرء سديمه الشخصي؟

إدراك الاتجاه

يقضي الخبراء حياتهم في جمع المعطيات والعمل على تأويلها. فالمحلل المالي هو الذي يتابع أسعار البورصة ويوصينا بشراء هذا السهم أو ذاك (بالمقابل تكون التوصيات بالبيع نادرة). ومدير الأعمال هو الذي يتابع تطور مبيعاته ويغير بالتالي مشترياته وتسويقه. والمهندس هو الذي يعمل على تقدير مخاطر فيضانات نهر معين انطلاقاً من معطيات تاريخية. والاقتصادي هو الذي يسعى إلى إدراك العلامات الأولى للانكماش أو لتجاوز الأزمة، في مغْمعة الأرقام التي تصله يومياً.

في جميع الحالات، يتعلق الأمر بتوضيح سلاسل طويلة من الأعداد. فلماذا لا نقوم نحن أيضاً بهذا التمرين؟ وإليكم سلسلة أولى من 15 عدداً:

0,116997

0,413233

0,969886

0,116828

0,412715

0,969526

0,118183

0,416862

0,972353

0,107532

0,383877

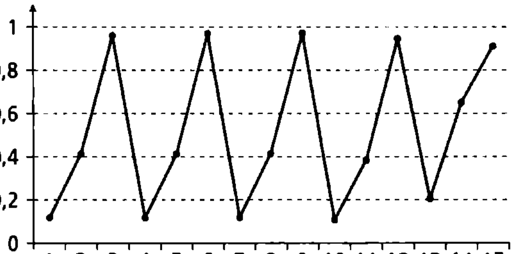
0,946062

0,204116

0,649810

0,910228.

طبعاً، هذه الأعداد لا تعني الشيء الكثير، لذلك سنقوم بتمثيلها على رسم بياني، كما يفعل الجميع. ولتوضيح الأمر، نشير إلى أن الفاصل الزمني بينها هو سنة، لذلك ستمثل أعدادنا عشر سنوات من المعطيات.

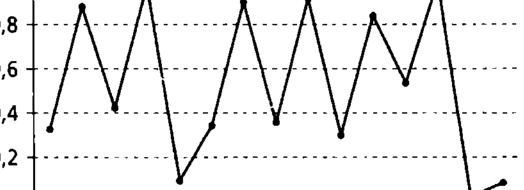


يبدو الأمر أفضل بهذا الشكل. فنحن نواجه ظاهرة دورية تقريباً، تمت ملاحظة 5 دورات متتالية صادرة عنها. وتستغرق كل دورة 3 سنوات، كما أن المؤشر يرتفع في السنة الأولى والثانية من 0,1 إلى 0,4، ثم من 0,4 إلى 1، لينزل في السنة الثالثة إلى مستواه السابق. وتُعتبر الدورات الثلاث الأولى متشابهة، إذ أن المؤشر يحافظ خلال هذه السنوات التسع على القيم نفسها بفاصل ثلاث سنوات وباختلاف يقارب 1٪. غير أن نظام الساعة سيختل بعض الشيء انطلاقاً من الدورة الرابعة، حيث سيبلغ الفاصل 10٪. أما في الدورة الخامسة، فيبدو الخلل بشكل كبير، إذ تتجاوز السنة الثانية التوقعات بحوالي 40٪. وفي جميع الأحوال لا يطرأ تغيير على الاتجاه العام، وعند نهاية الدورة يصل المؤشر إلى 0,91 بدل 0,95 ثلاث سنوات من قبل. هكذا، يتضح بأن الاختلاف لم يبلغ 5٪، ويمكننا اعتبار هذه القيمة الفاصلة والعالية جداً بمثابة خلَل مؤقت لن يؤثر طويلاً على العملية الدورية.

غنيٌّ عن البيان أن هذه العملية المبسوطة على مدى 15 نقطة تقاطع، تعتبر مميزة ولا يمكنها أن تكون وليدة الصدفة. فهناك على ما يبدو آلية تشتغل وتضمن هذا

الانتظام وكأنها ضابطة مخفية للنَّغم métronome. صحيح أن الدورة الخامسة مختلفة بعض الشيء عن الدورات الأخرى، فالآلة الضابطة المذكورة تخطت إيقاعاً معيناً. لكن، هل يكفي ذلك لإعادة النظر في العملية الدورية؟ وإذا كان المطلوب منا القيام بتوقُّع، فماذا سنقول؟ سنعتبر بأن هناك على الأرجح صدمة من الخارج ومصادفة غير مفسَّرة، لكن الأمور ستنتظم من جديد. فالآلة التي اشتغلت بشكل جيد مدة 15 سنة لا يمكن أن تتعرض للعطل بسهولة.

يتعين على نقطة التقاطع الموالية المتعلقة بالسنة السادسة عشرة أن تتموقع ما بين 0,1 و 0,2. كما يجب الانطلاق مجدَّداً من دورات تستغرق 3 سنوات. فلنعاين الآن نقط التقاطع الخمس عشرة التالية من السلسلة نفسها.



يا إلهي، لقد فشلت العملية! فنقطة التقاطع الأولى (المقابلة للسنة السادسة عشرة) تتموقع في 0,37، أي ضعف القيمة المتوقعة. أما دورة 3 سنوات، فإنها اختفت بكل بساطة. أكثر من ذلك، يمكننا أن نلاحظ في هذه المعطيات دورة غير منتظمة من سنتين، حيث تبلغ القمة في السنة الأولى وتصل إلى القعر في السنة الثانية. فالقيم تختلف كثيراً من دورة إلى أخرى، وهو ما يتنافى مع انتظام الدورة الثلاثية خلال السنوات الخمس عشرة الأولى. وفضلاً عن ذلك، فإن الدورة الثالثة تستمر 3 سنوات في الواقع بدل سنتين (وقد وجد المؤشر هنا صعوبة في الانطلاق)، كما يبدو أن الدورتين الخامسة والسادسة شكلتا دورة واحدة من أربع سنوات (لأن النقطة السفلية التي تفصل بينهما تصل إلى مستوى القمة تقريباً).

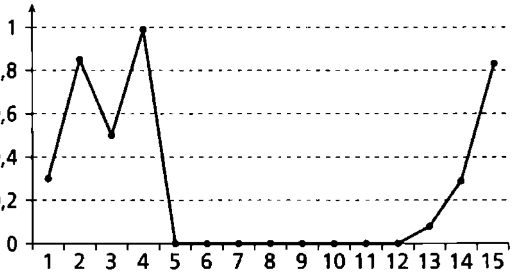
باختصار، يجب أن نكون على استعداد للإقرار بوجود عملية دورية داخل هذه الأرقام، ولربما كان من الأفضل الحديث عن توالي الاهتزازات التي تتراوح مدتها ما بين 2 و 4. وهنا سنصبح مطالَبين من جديد بتوقع ما سيحدث.

ولأن الفشل الأول أصابنا بالخيبة، فإننا سنكون

حذرين هذه المرة. وسؤالنا هو: ما الذي نعرفه الآن بالضبط بعد نقط التقاطع الثلاثين الأولى؟ لقد انكسرت دورة ثلاثية منتظمة، مما أدى إلى ظهور دورات غير منتظمة من سنتين إلى أربع سنوات، كما يحدث عندما تنكسر الأمواج الصاخبة وتتفرق إلى أمواج صغيرة ومتقطعة. وإذا ما قبلنا هذه المماثلة البحرية، فإننا سنعلن لاحقاً عن وجود الأمواج (نقصد الدورات) نفسها غير المنتظمة خلال مدة قصيرة (من 1 إلى 4)؛ لكن التفاوت قوي بينها، بحيث تبلغ القمة 1 وينزل القعر إلى أقل من 0,5.

يبدو هذا الأمر معقولاً وهو ملائم في جميع الأحوال؛ ذلك أن توقع بقاء ساعة معطلة، أقل مجازفة من الإعلان بأنها ستعمل من جديد. فلننشر إعلاننا إذاً: «لقد كان انكماش السنة الماضية عميقاً جداً (2٪) ولن يسمح لنا بالتخلص من الورطة هذه السنة. فالمؤشر يتموقع عند مستوى 8,5٪، وهو قريب من المستوى الذي بلغه منذ 10 سنوات (أي 9,5٪)، حيث تلته في تلك الفترة دورة ثلاثية، قبل العودة إلى الإيقاع الثنائي. ويتعين توقع حدوث الظاهرة نفسها من جديد، أي أن يبلغ المؤشر حوالي 30٪ في السنة المقبلة، ثم 95٪ في

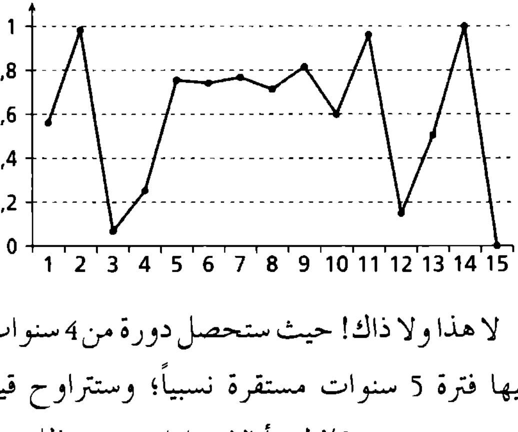
السنة التي تليها. ففترة الصعود القوي التي عرفناها خلال الثلاثين سنة هذه، ستستمر على المدى المتوسط والطويل. كما أن السنوات الجيدة التي سيقترب فيها المؤشر من 100٪، ستتناوب مع سنوات أقل جودة سينزل فيها المؤشر إلى أقل من 50٪، حيث سيستقر في منطقة تتراوح قيمتها بين 30 و 40٪».



لكن، يا إلهي! ها نحن قد فشلنا مرة أخرى! فعلى المدى القصير لم يحصل مشكل بالرغم من بلوغنا 85٪ فقط في السنة الثانية، بدل 95٪ المعلن عنها؛ لكن الأمور ستتغير في ما بعد. فأين هي فترة الصعود التي تم الإعلان عنها؟ ذلك أن الأمور ستهدأ خلال السنة الخامسة وسيتوقف النظام حتماً عند الصفر (0) خلال ثمان سنوات. من كان باستطاعته توقع ذلك؟ إن الأمر يتطلب وجود شخص مثل فرعون المذكور في التوراة

(وفي القرآن الكريم أيضاً) الذي رأى في المنام ﴿سبع بقرات سمان يأكلهن سبع عجاف﴾ وأيضاً وجود شخص مثل يوسف لتأويل الحلم.

كيفما كان الحال، فإن هذه الفترة كانت بمثابة الضربة القاضية لسمعتنا كمتنبئين أو «كزعماء روحيين». لهذا قررنا الاهتمام بما سيحدث، من موقعنا المخملي الذي لجأنا إليه لتفادي غضب ضحايانا. فكيف سينطلق النظام من جديد؟ وهل سيستقر أم سيبدأ في الاهتزاز؟



لا هذا ولا ذاك! حيث ستحصل دورة من 4 سنوات، تليها فترة 5 سنوات مستقرة نسبياً؛ وستراوح قيمة المؤشر بين 74 و 82٪ لتبدأ الاهتزازات، بعد ذلك، في دورة من سنتين، متبوعة بدورة من 3 سنوات. وبصيغة مبسطة نقول إن الأمر لا يستحق الاهتمام!

أما أبرز نتيجة لهذا التحليل فتتمثل في فقداننا

للبوصلة. فعند النقطة التي وصلنا إليها، يبدو أن الظاهرة الملاحظة طارئة وبالتالي احتمالية، لذلك فنحن مطالبون بإجراء تحليل إحصائي خالص. ويمكننا في ضوء نقط التقاطع التي جمعنا، والتي بلغت الآن 60 نقطة، القيام بحساب احتمالات شرطية: فإذا كانت القيمة الملاحظة خلال هذه السنة هي x، فما هو احتمال ملاحظة القيمة y في السنة المقبلة؟

تسمح لنا هذه الاحتمالات بالقيام بتوقعات محدَّدة، فمن بين كل القيم الممكنة لـ y سنعلن عن أكثرها احتمالاً، مع أخذ الاحتياطات المألوفة بعين الاعتبار، ونقصد بذلك فسحة الثقة الخ... ومع مرور الوقت، تكتسب احتمالاتنا دقة أكبر، كما تكتسب توقعاتنا جودة أكبر، وهذا ما نرجوه. لكنها تظل غير يقينية مع ذلك، فليس الحدث المحتمل أكثر هو الذي يتحقق دائماً. فإذا كان احتمال وقوع $y1$ هو 2/3 واحتمال وقوع $y2$ هو 1/3 وقمنا بتوقع $y1$، فإن خطأنا سيكون بمقدار واحد على ثلاثة. غير أن تبني هذه المقاربة يعني التخلي بكل تأكيد عن توقع ما سيحدث سنة بعد أخرى. فالحقيقة الوحيدة التي يمكن أن نرجوها هي من طبيعة إحصائية وتتعلق بمعدلات مستخلصة من عدد كبير من نقط التقاطع.

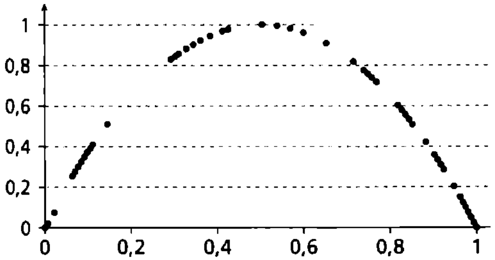
توجد الحقيقة بقعر البئر

تبدو النتيجة حتمية إذاً، ومفادها أن النظام يتوقف على الصدفة لأن التوقع الوحيد الممكن إحصائي. ومع ذلك، فنحن لم ننتبه إلى ما هو أساسي، إذ يكفي عرض الأعداد نفسها بطرق مختلفة لكي تبرز بداهة جديدة أمام أعيننا. وما سنقوم به الآن، هو تجميع الأعداد في أزواج، حيث يتضمن كل زوج نقطتي تقاطع متتاليتين. هكذا يبدو كل عدد (باستثناء الأول والأخير) في زوجين. وهو في الزوج الأول يكون مقترناً بنقطة التقاطع السابقة، وفي الزوج الآخر يكون مقترناً بنقطة التقاطع اللاحقة. وستظهر كل الأعداد في زوجين، باستثناء العدد الأول والأخير كما قلنا، لنحصل بالتالي على 58 زوجاً من الستين عدداً التي قمنا بتجميعها.

بقي علينا أن نمثّل لهذه الأزواج برسم بياني. وتتلخص الطريقة الكلاسيكية في تمثيلها بنقط على ورقة، حيث نضع محورين للإحداثيات. ويمثل العدد الأول الإحداثي السيني (الأفقي) أما الثاني فيمثل إحداثي النقطة (العمودي). بذلك سيتم تمثيل الزوج الأول (0,116997، 0,413233) بنقطة موجودة بمربع الضلع 1، قريباً من الجانب الأسفل (لأن 0,12 قريب

جداً من 1) وعلى يسار الوسط العمودي (لأن 0,41 أصغر من 1/2).

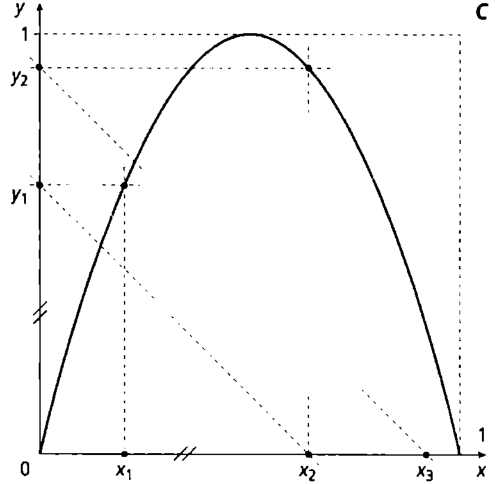
ويتم تمثيل الزوج الثاني (0,413233، 0,969886) بنقطة موجودة بالمربع نفسه القريب من الضلع الأيمن (لأن 0,97 قريب جداً من 1) وأسفل الوسط الأفقي شيئاً ما. هكذا، سنطبق الأمر نفسه على نقط التقاطع كلها وبذلك سنحصل على الشكل التالي:



أليس الأمر مدهشاً؟ يدمر هذا الشكل البسيط على الفور النتيجة التي توصلنا إليها، إذ أن نقط التقاطع لا يمكنها أن تكون طارئة. فلو كانت هناك ذرة من الصدفة، فإن الانحراف سيحصل عند تتالي الأزواج، ولن تتموقع النقط المقابلة لها في المنحنى. وما كنا سنلاحظه هو سحاب من النقط منبسط وكثيف بهذا القدر أو ذاك، لكنه يشكل سحاباً. أما ما نلاحظه هنا فليس سحاباً، بل

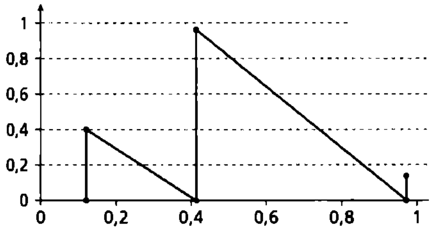
هو منحنى رياضي حقيقي من دون كثافة. الأمر يتعلق بشلْجم parabole سنرمز إليه من الآن فصاعداً ب C. وهو يخترق المحور الأفقي ($y= 0$) عند النقطة $x = 0$ و $y = 1$؛ ويبلغ القمة التي تساوي 1 عند النقطة $x = 0,5$ و $y = 1$. وستكون معادلة هذا الشلجم هي: ($y = 4x (1 - x)$. يمكننا إذاً عدم الرجوع إلى الصدفة. يبدو تتالي الأعداد احتمالياً، لكن تتالي النقط لا يبدو كذلك. وعند اكتشاف المنحنى C الذي تتموقع فيه النقط يمكننا أن نسجل بوضوح قانون تتالي الأزواج.

لنعتبر x_n هي كذا نقطة تقاطع، بذلك ستكون نقطة التقاطع السابقة هي x_{n-1}.



يتطابق الزوج (x_{n-1}, x_n) مع نقطة على المنحنى C. لنعتبرْ بأن هذه النقطة هي M_n ولنتساءلْ كيف يمكننا الحصول على النقطة الموالية M_{n+1}. نحن نعرف مسبقاً إحداثيتها الأفقية x_n التي هي الإحداثية العمودية لـ M_n. وهي من السهل بناؤها هندسياً، إذ يكفي قياس علو M_n ونقله إلى المحور الأفقي على يمين الأصل والارتكاز على نقطة المنحنى C الموجودة فوق، وهي النقطة المبحوث عنها M_{n+1}. يشير الشكل الموالي إلى بناء الأزواج الثلاثة وفْق هذه الطريقة. فالقمم الثلاث للرسم البياني هي النقط M_1 ، M_2 ، M_3 المقابلة للأزواج الثلاثة الأولى. وكما سبقت الإشارة إلى ذلك، فإن نقطة التقاطع الأولى هي x_1=0,116997 ونقطة التقاطع الثانية هي x2 = 0,413233. يقدم لنا هذان العددان الوضعية المحددة بالنسبة لمحوري النقطة M_1 الموجودة على اليمين. لذلك يُنقَل ارتفاع 0,413233 إلى المحور الأفقي (مع العلم أن المحورين لا يوجدان على السلم نفسه). وقد تتموقع نقطة جديدة في المنحنى C، هي النقطة M_2. كما يؤدي ارتفاع هذه الأخيرة إلى تموقع أفقي لنقطة جديدة داخل المنحنى المذكور وهي النقطة M_3. هكذا تُبنى كل النقط المتتالية بالطريقة نفسها،

ويُعتبر ارتفاع النقطة M_n بالضبط بمثابة نونية nième نقطة التقاطع x_n أي نونية عدد السلسلة المعطاة.



إن الملاحظ أن المنحنى C، أي الشلجم ($y = 4x$ $1-x$) لم يحدَّد في هذا الرسم البياني؛ لكن بإمكان مخيلة القارئ أن تتصوره بسهولة. فهذا المنحنى يمر عبر النقط الثلاث M_1 ، M_2 ، M_3 (التي بنيت بهذه الطريقة) وعبر باقي النقط الأخرى.

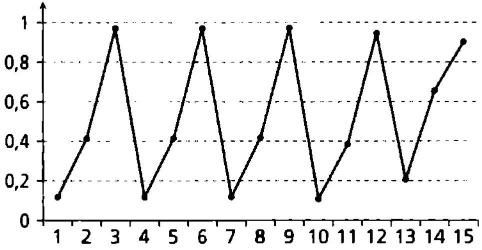
هذه الآلية البسيطة هي التي تختفي وراء سلسلة الستين عدداً المستعصية على التحليل، ويبدو كأن هذه الآلية اشتغلت بالرغم من عدم انتظام الحركة الذي جعلنا نعتقد بوجود الصدفة. لكن الأمر غير ذلك؛ فعلى عكس المظاهر، ليست السلسلة المقترحة احتمالية، بل هي حتمية. وبإمكان أي واحد أن يحدثها من جديد، مثلما فعلت شخصياً، حيث قمت ببنائها بالاعتماد على الحاسوب؛ إذ يكفي إدخال القيمة البدئية

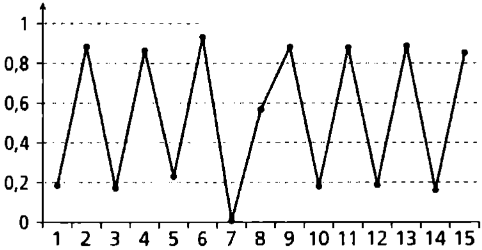
x_1=0,116997 والقيام على التوالي بحساب ...x_2 , x_3 x_n وفق صيغة التردُّد récurrence المتمثلة في: $.x_n+1=4x_n(1-x_n)$

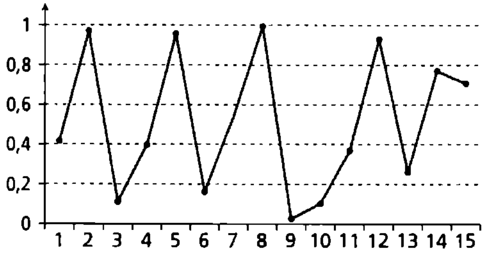
بعد ذلك، نستخدم هذه الآلية لإبراز مختلف خصائص السَّديم الحتمي. وقد سبق أن تعرفنا على الحالة الأولى التي تتلخص في كون السلسلة تقلد الصدفة. أما الآن فسننتقل إلى الحالة الثانية المتمثلة في عدم الاستقرار الأُسّي instabilité exponentielle.

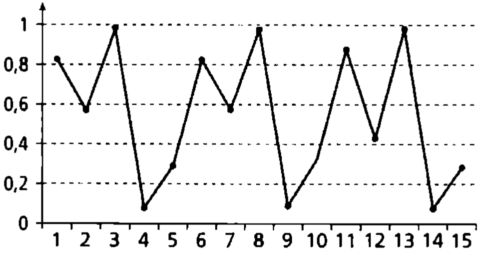
تأثير الفراشة

بدايةً، علينا أن نعيد إحداث تجربة لورنز. فإذا ما طبقتم ما قلت لكم بالضبط، أي إذا أدخلتم القيمة البدئية x_1=0,116997 وقمتم بحساب القيم اللاحقة باستعمال صيغة التردُّد، فإنكم ستحصلون على أربع سلاسل من 15 قيمة وهي كالآتي:


1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15


1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15


1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15


1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

إنه لشيء جميل بكل تأكيد، لكن لا علاقة له بما سبق أن أعلنت عنه! فأين يوجد التوقف الحاصل على مدى ثمان سنوات، ما بين 35 و 43 سنة؟ في الواقع، تعتبر السلسلة الأولى المكونة من 15 قيمة الوحيدة الشبيهة بالسلسلة التي رأينا؛ وابتداء من السلسلة الثانية، سيحدث اختلاف تام بين السلسلتين. فما الذي حصل؟

سيزداد الغموض إذا ما وضعنا سلسلتي الأعداد جنباً إلى جنب. على اليسار توجد الأعداد التي حصلت عليها أول مرة وقمت بالتعليق عليها. وعلى اليمين هناك الأعداد الجديدة المحصَّل عليها انطلاقاً من القيمة البدئية x_1=0,116997 (وسيتم تمثيل الأعداد الخمسة عشر الأولى).

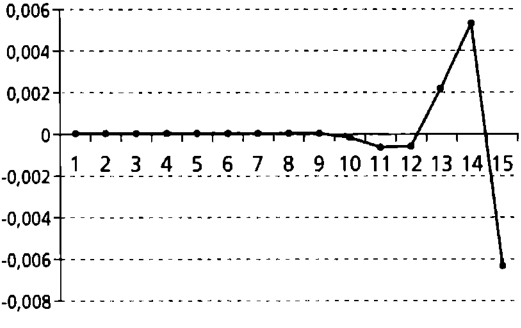
0,116997	0,116997
0,413233	0,413235
0,969886	0,969887
0,116828	0,116824
0,412715	0,412705
0,969526	0,969518
0,118183	0,118211

0,416862	0,416948
0,972353	0,972409
0,107532	0,107318
0,383877	0,383203
0,946062	0,945434
0,204116	0,206356
0,649810	0,655092
0,910228	0,903785

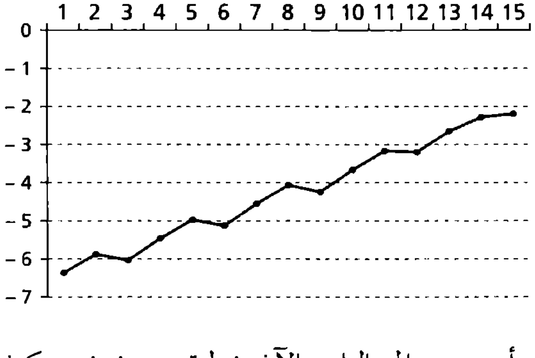
هكذا ستختلف السلسلتان ابتداء من العدد الثاني! ومع ذلك، فإن هذا العدد يُحسَب فيهما معاً عبر تطبيق الصيغة: $x_2 = 4x_1\ (1-x_1)$. وسيزداد الفارق الذي كان ضئيلاً في البداية مع استمرار الحساب. فالفارق الذي كان يتحدد بين العددْين الثالثيْن، في جزء من المليون، سيصل إلى جزء من المائة في العددين بالرتبة 13، بمعنى أن هذا الفارق تضاعف بعشرة آلاف خلال عشر مراحل فقط!

هذا بالضبط ما حصل للورنز في ذلك اليوم الحاسم الذي اكتشف فيه أثر الفراشة. ويكمن التفسير في الأعداد العميقة التي ليس بها كسور. فالسلسلة الموجودة على اليسار تمثل العمود اليساري على

حاسوبي الذي أرتب فيه النتائج كلما حصلت عليها. وتظهر هذه النتائج، من حيث المبدأ، بسبعة أعداد دالة، علماً بأن الحساب يجري بستة عشر رقماً. فالعدد 0,116997 الموجود بالأعلى، يمثل في الواقع عدداً آخر يمكنني الحصول عليه بالنقر على الخانة أو بتوسيع العمود، وهو : 0,1169966564757943، في حين أن العدد 0,116997 هو الحقيقي. والملاحظ أن الفارق ضئيل جداً، إذ لا يتجاوز 3 أجزاء من المليون، لكنه يكفي لإطلاق النظام في مدار جديد، بحيث لن يستغرق الأمر أكثر من 15 مرحلة لينفصل هذا المدار عن القديم. وإليكم الشكل الذي تطور من خلاله الفارق بين المداريْن (وقد قمنا بحساب الفارق بين عدد اليسار وعدد اليمين عند كل مرحلة، وحدّدناه بالرسم البياني التالي):



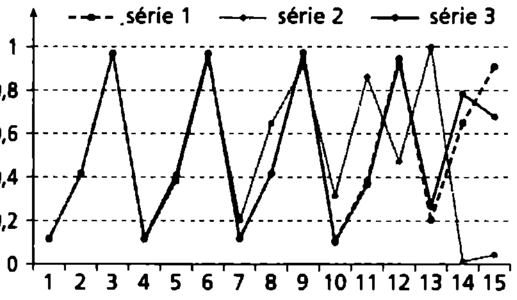
لقد ظل المداران على ما يبدو متقاربيْن على مدى 12 مرحلة، لكنهما انفصلا فجأة في النهاية. والحال أن الأمر لا يعدو كونه خداعاً بصرياً. ففي الواقع، انفصل المداران بالإيقاع نفسه منذ البداية، بحيث تضاعفت الفوارق 10 مرات عند كل 4 مراحل. ولأن الفارق البدئي ضئيل، فإنه لم يظهر لمدة طويلة رغم أنه تضاعف بانتظام 10 مرات. وكان علينا انتظار تضاعفه ألف مرة، أي خلال 12 مرحلة، ليظهر على الرسم البياني. ويمكن أن تختفي هذه المشكلة إذا ما نقلنا لوغاريتم الفارق لا الفارق نفسه.



أصبحت المتواليات الآن خطية، حيث نرى كيف يتضاعف الفارق 10 مرات عند كل أربع مراحل. وبصيغة أخرى، فإن الزمني الفلكي للنظام هو $T = 4$، وتكفي حوالي 100 مرحلة لنحصل على نظام تكبير

قدره 10^{25}، وهو ما يمثل الفارق بين الطاقة الناجمة عن رفرفة جناح الفراشة وطاقة إعصار استوائي. ولحسن الحظ، فإن أشياء عديدة يمكنها التشويش على هذا التزايد الأُسّي؛ فليست كل الفراشات مسببة للأعاصير.

في الأخير، نود الإشارة إلى تأثير فوارق من حجم 100/1 و 1000/1 على القيمة البدئية. وتبدو هذه الفوارق ضعيفة جداً (فليس من السهل ضمان دقة 100/1 بالنسبة لقياس معين)، لكن السلاسل الثلاث تنفصل بسرعة، كما يظهر لنا من خلال الرسم البياني التالي:



وباستطاعة القارئ المتوافر على حاسوبه الخاص، اكتشاف الإمكانيات التي يقدمها هذا النظام، إذ يكفيه استخدام صيغة التردُّد $x_{n+1} = 4x_n (1 - x_n)$. ويعبر هذا النظام عن السَّديم الحتمي بالرغم من بساطته، مع العلم

بأن العديد من خصائصه ما زالت لم تفهم بشكل جيد. فبإمكاننا مثلاً أن نلاحظ ميل النظام إلى الاقتراب مرات عديدة من النقطة 1. هل يمكننا تعداد هذا التكرار؟ وهل باستطاعتنا القول إن النظام يُمرِّر من خلال عدد كبير من المراحل N، عدداً (pN) يتراوح بين 0,95 و 1 والقيام بالتالي بحساب النسبة p؟

يبدو القيام بهذه التجربة مُغْرياً. فلنعملْ على تشغيل برنامج الجدْولة بالحاسوب ولنقمْ بحساب 10 آلاف أو 100 ألف أو مليون مرحلة، ولنعاينْ كم مرة تتكرر النتيجة بالمنطقة المعنية؟ لكن للأسف لن تبرهن حساباتنا على أي شيء. فحاسوبي مثلاً يشتغل على الأعداد الستة عشر الأولى، مما يعني أنني قد أرتكب خطأ يقدَّر بحوالي 10^{-17}. وبمقتضى ذلك، يتعيَّن حصول $4x17=68$ مرحلة لبلوغ رقم 1، أي لتغيير المدار تماماً (علما بأن أخطاء شبيهة تنضاف عند كل مرحلة من مراحل الحساب). ولن يعود لكل النتائج التي تمَّ حسابها بعد المرحلة السبعين أيُّ ارتباطٍ بالخصائص الرياضية للنظام، لأننا سندرس في هذه الحالة خصائص الحاسوب. هنا تبدو صعوبة اعتماد الرياضيات التجريبية.

في الختام، يمكننا أن نستخلص درسيْن من كل ما

سبق. أما الدرس الأول، فهو أن الحاسوب يقف عند حدود معينة بأسرع ما يمكننا تصوره عموماً، رغم كونه أداة بالغة الفعالية. أما في نظام بسيط مثل النظام الذي قمنا بدراسته، فإن هذه الحدود تبرز بعد 70 مرحلة. طبعاً، يمكننا الزيادة في التدقيق، أي في عدد الأرقام الدالة، لكن الأمر المؤكد هو أننا لا نعرف قيمة x999 أو x1000، وهما القيمتان المترتِّبتان عن المرحلة 999 أو المرحلة 1000، بالرغم من كونهما محدَّدتيْن رياضياً بدقة. أما الدرس الثاني فهو أن بإمكاننا، بفضل الرياضيات هذه المرة، تقديم معلومة عن هاتين القيمتيْن المجهولتيْن. فالزوج (x_{999} و x_{1000}) يوجد في موقع ما في المنحنى $y=4x\ (1-x)$. وهو ما يميز النظام السَّديمي عن الصدفة الخالصة. فإذا كانت x_{1000} قد حصلت عن طريق الصدفة وباستقلال عن الباقي، فإننا لن نستطيع تقديم أي معلومة بخصوص الزوج (x_{999} و x_{1000}).

القسم الثاني

آلات ورياضيات

تُعتبر الأنظمة السَّديمية غير مستقرة تماماً. فالفوارق البدئية الصغيرة تؤدي بسرعة إلى انحرافات كبيرة. وباستطاعة عدم الاستقرار الآلي هذا أن يؤدي إلى عدم استقرار رقمي؛ فالأخطاء الحسابية الصغيرة والأخطاء المتعلقة بجبر الأعداد قد تحرِّف الحل بشكل سريع جداً. كيف تمكن لورنز ولاسكار إذاً من عرض نتائجهما بمنتهى الثقة في النفس؟

إن الإجابة على هذا السؤال ستدفعنا إلى التساؤل عن مفهوم النموذج، والتفكير في مكانة الرياضيات داخل العلم. وسنرى كيف أن نظرية السَّديم تتموقع بمنطقة متاخمة، تعبر فيها الرياضيات عن إدراكنا للواقع بفعل الأدوات المعلوماتية.

كيف نحسب المدارات غير المستقرة ؟

عودة إلى تجربة لورنز

لتوضيح جاذب لورنز وسديم حركات الكواكب، قمنا بعمليات اصطناع رقمية، أي أننا عملنا على حساب عدد معين من المدارات التي تتبعناها بحسب طاقتنا، معتمدين في ذلك على الحاسوب، وعرضناها على رسوم بيانية بشاشة هذا الأخير. وبشكل عام، تم التأكيد على أهمية هذه العمليات الاصطناعية، التي لم تصبح ممكنة فقط بل سهلة أيضاً، وذلك بفضل التقدم الحاصل في الأدوات المعلوماتية وتقنيات الحساب. فقد سمحت هذه الأدوات الجديدة بتعويض التجربة الفيزيائية عندما لا تكون ممكنة (ومعلوم أنها تكون مستحيلة أحياناً).

صحيح أننا نبتغي إنجاز نموذج مختصر للنظام الشمسي بالمختبر ومتابعة ردود أفعاله عندما نغير مختلف المعايير (الكتل والمواقع والسرعة البدئية)، لكن ذلك يتطلب إخراجه من الجاذبية الأرضية، أي تحقيق التجربة في انعدام الجاذبية. وربما ستتحقق هذه التجربة يوماً ما

في إحدى المحطات الفضائية؛ وفي انتظار ذلك، نجد أنفسنا مضطرين لاستثمار حسابات لاسكار. لكن هل يمكن أن نثق فيها؟ من المؤكد أن جاك لاسكار عالم شهير وهو صديق لنا ولا يجادل أحد في كفاءته. غير أن المشكلة التي أثيرُها هنا أعم من ذلك، وربما تساءل بعض القراء من تلقاء أنفسهم قائلين: ألا يمكن أن تؤدي عمليات تصحيح الأعداد التي يقوم بها الحاسوب أثناء إجراء العمليات الحسابية، وهي أخطاء صغيرة بالنسبة للمدار الصائب، إلى تحريف هذا الأخير بشكل سريع جداً؟ وهل هناك ضمانة تفيد بأن المدار المحسوب سيظل قريباً من المدار الصائب؟ ألم نتعوّد عكس ذلك، وفي إطار الأنظمة السّديمية، على معاينة تحول ما كان يشكل في المنطلق تقريباً متميزاً وصائباً في حدود 6 و 12 و 24 عشرية، إلى مدار مختلف تماماً مع مرور الزمن؟

لفهم كل ذلك، علينا إعادة قصة لورنز. فقد استأنف الحساب من الوسط وأدرك بأن المدار الذي أعيد حسابه مختلف تماماً عن المدار البدئي. هناك إذاً خطأ في مكان ما، استطاع اكتشافه في الأخير. ففي المرة الثانية، اقتطع المعطيات واحتفظ فقط بثلاثة أرقام من بين الستة المتوافرة. بذلك، اعتبر المدار المحسوب

من جديد هو «الخاطئ»، ما دام الأول «صائباً». لقد عاد النظام من جديد إلى المقر وتم اكتشاف المخادع، ويمكننا الآن أن ننام ملء جفوننا وأن نفتخر بما أنجزناه. لكن هذه الطمأنينة زائفة، وهي مجرد وهم. وأنا أزعم بأن المدار الأول «خاطئ» مثل الثاني. فلنأخذْ هذا المدار الذي زعم بأنه «صائب» ولنتابعْ ما سيقوم به الحاسوب. سنضبط المدار عند الوسط، في اللحظة التي تدخَّل فيها لورنز لتسجيل القيم الاثنتي عشرة المستمدَّة من المتغيرات البيانية الاثنتي عشر أيضاً. وتتضمن هذه القيم 6 أرقام دالة، لن يحتفظ منها لورنز سوى بثلاثة، أما الحاسوب فسيتابع عملياته بستة أرقام، مرتكزاً على المدار «الصائب».

لكن ماذا سيحدث في اللحظة الموالية؟ سيقوم الحاسوب بتقطيع الزمن إلى أجزاء صغيرة ولحظات متتالية وحساب الوضعية اللاحقة انطلاقاً من الوضعية السابقة ومن معادلات الحركة. ورغم بساطة هذه الأخيرة، سيكون من اللازم القيام بعمليات ضرب عديدة. والحال أننا عندما نعمل على ضرب عددين من ستة أرقام فيما بينهما، نحصل على عدد من 11 أو 12 رقماً (وينبغي على القارئ التأكد من ذلك). وهنا

سيواجه حاسوبنا بعض الصعوبات؛ فقد كان واثقاً من الحفاظ على معطياته بستة أرقام، بينما انطلق لورنز بعزم من معطيات ناقصة بمدار خاطئ. لكن في اللحظة الموالية، وبعملية حسابية بسيطة، تحولت الأرقام الستة إلى 11 أو 12 رقماً، لذلك تعيَّن تصحيحها أي اختصارها لتصبح ستة.

صحيح أن الانخفاض من أحد عشر رقماً إلى ستة، أهْون من الانخفاض من ستة إلى ثلاثة أرقام، فالدقة المسجَّلة التي قُدرت بواحد على مليون في الحالة الأولى، أصبحت واحداً على ألف في الحالة الثانية. لذلك، يُعتبر الحاسوب أدقَّ في حسابه من لورنز في خطئه، لكن الفارق هنا في الدرجة وليس في النوعية. فالحاسوب ولورنز قاما بالشيء نفسه، بحيث إنهما اختصرا المعطيات، مع فارق بسيط هو أن لورنز أجرى العملية مرة واحدة، في حين لجأ الحاسوب إلى الاختصار عند كل مرحلة من مراحل الحساب.

وإذا كانت مثل هذه النتائج ستصدر عن خطأ لورنز، فكم سيبلغ عدد الأخطاء المتراكمة أثناء محاولة الاختصار في المدار برمَّته؟ أكيد أن هذه الأخطاء أصغر، لأنها تندرج في إطار واحد على مليون بدل واحد على

ألف، لكن وبغض النظر عن تراكمها، فقد سبق أن رأينا كيف أن الحجم لا يؤثر في العملية. والخطأ الأصغر بألف مرة من خطأ آخر، يُدرَك مع ذلك؛ وكل ما هناك هو انتظار بعض الوقت، وتحديداً انتظار زمن فلكي مضاعف 3 مرات لتكون العملية دقيقة.

لا أحد يجادل في البرهنة إذاً. لكن، لنفترض بأن المدارين المحسوبين من طرف لورنز ليسا جيديْن، فأين سنجد المدار الجيد؟ وكيف نحصل على المدار «الصائب» الذي برهنت الرياضيات على وجوده وعلى تطابقه مع المعطيات البدئية؟ من المؤكد أننا لن نحصل عليه بالزيادة في التدقيق. فإذا ما احتفظنا بتسعة أرقام بدل ستة، منذ عملية الضرب الأولى، فينبغي علينا اختصار الأرقام من 17 أو 18 إلى 9، أي أننا سنرتكب خطأ يقدر بواحد على مليار، ويمكن إدراكه بمضاعفة الزمن الفلكي 9 مرات، من دون حساب أخطاء الاختصار الأخرى التي قد تحدُث وتتراكم خلال عملية الحساب. سيكون الحل الوحيد هو عدم اختصار الأرقام، لكن هذا الأمر غير ممكن أيضاً. فإذا ما انطلقنا من معطيات بستة أرقام، فسنحصل في اللحظة الموالية على معطيات باثني عشر رقماً، وفي اللحظة التي تليها على أربعة

وعشرين رقماً ثم ثمانية وأربعين فستة وتسعين، ثم مائة واثنين وتسعين فثلاث مائة وأربعة وثمانين، ثم سبع مائة وثمانية وستين، فألف وخمس مائة وستة وثلاثين؛ وباختصار، فبمجرد انطلاقنا، سنجرُّ وراءنا 1500 رقم بالنسبة لكل متغيِّر (ولدينا كما هو معلوم 12 متغيراً). وبهذه الوتيرة، سنملأ ذاكرة الحاسوب بترتيب القيم الجارية فقط. تبدو المشكلة بدون حل إذاً. فالمدار «الصائب» الذي يطابق الشروط البدْئية المحدَّدة من لدننا، لم يعد في متناول الحساب. وكيفما كانت الدقة المعتمدة في الحسابات، فإن المدار المحسوب سيبتعد عنها بعد فترة طويلة تقريباً، لكنه سيبتعد عنها بكل تأكيد. فما هي دلالة الاصطناع الرقمي في ظل هذه الشروط؟

إننا لا نحسب مداراً واقعياً (ما دمنا لا نعرف الشروط البدئية الواقعية بدقة كافية) ولا مداراً «صائباً» (ما دمنا لا نعرف القيام بالحسابات بالدقة الكافية). فماذا نحسب بالضبط؟ حسب نتائج لاسكار، سيتوافر النظام الشمسي على زمن فلكي يناهز 10 ملايين سنة. ومعنى ذلك أن الفوارق الصغيرة ستضرب في 10 خلال هذه المدة الزمنية. مع العلم أنه يزعم متابعة

تطور النظام المذكور على مدى مليارات السنوات، حيث سيستخلص نتائج متعلقة بمستقبل هذا النظام وماضيه وباحتمال انفلات عطارد من مداره أو إمكانية أن تنقلب الزهَرة. لكن مليار سنة هي عبارة عن الزمن الفلكي مضاعفاً 100 مرة. ولمعرفة أين ستكون الكواكب خلال مليار سنة، يجب معرفة كتلتها ومواقعها وسرعتها، اعتماداً على 100 رقم دال. ولا يمكن لأي أحد، بما في ذلك لاسكار، أن يزعم معرفة هذه المعطيات بمثل هذه الدقة التي لا تُعتبر فقط غير قابلة للقياس كما رأينا، بل أيضاً غير متوافرة على أي دلالة فيزيائية. فضلاً عن ذلك، يجب القيام بحسابات بالدقة نفسها، أي بالاعتماد على 100 رقم دال، وهذا أمر مستحيل. وإذاً، يبدو أن نتائج لاسكار متناقضة في حد ذاتها، لأنها تؤكد على أن شروط التوقع الصائب على مدى مليار سنة غير متوافرة.

ماذا نحسب في الواقع؟

يعتمد حل المفارقة على نتيجة رياضية مذهلة معروفة بالتسمية الإنجليزية الاستعارية *Shadowing lemma* (القضية الأولية لاقتفاء الأثر). وهذه القضية هي عبارة

عن مسألة رياضية تتسم بخاصية تقنية عموماً بحيث يصعب البرهنة عليها؛ أما اقتفاء الأثر فهو شبيه بعمل التحري الذي يلازم الشخص المشتبه به. وتضمن لنا القضية المذكورة بأن هناك بمعنى ما توازناً بين الارتياب المتعلق بالوضعية البدئية وأخطاء الاختصار؛ إذ يوجد مدار «صائب» (بالمعنى الرياضي، أي أننا نحس بوجوده رغم صعوبة البرهنة على ذلك)، مطابق للمدار المحسوب بالدقة المعتمدة في الحساب، وهي 3، 6، 12، أو 24 رقماً. بالتالي، فإن المدارين سيتطابقان داخل الحاسوب. غير أن لفظ «مدا» يظل غامضاً هنا، لأن المدار «الصائب» هو الذي يتلاءم مع هذه التسمية، ما دامت القضية الأولية لاقتفاء الأثر تضمن وجوده. فكل نقطة من نقطه تُستنبط من سابقتها، عبر تطبيق صارم للمعادلات المحددة للنظام، بدون أخطاء ولا اختصار. أما المدار «المحسوب» فلا يُعتبر كذلك؛ فكل نقطة من نقطه تتضمن خطأ وكل أخطائه تتضخّم وتتراكم، إلى درجة نتساءل معها حول الكيفية التي سيكون عليها المنتَج النهائي. وفي كل الأحوال، هو لا يعتبر مداراً حقيقياً، محدَّداً بالتطور الطبيعي للنظام، وكل ما هنالك أنه مدار «مشوش» بتأثير من عوامل خارجية مشوّشة.

لكن الأمر المذهل، هو أن هذا المدار المشوش أو الزائف، قريب من المدار الحقيقي، بحيث نجد صعوبة في التمييز بين دقة كل واحد منهما. والملاحظ أن عدم استقرار المدار هو الذي يجعل هذا الأمر العجيب ممكناً. فباستطاعتنا تعويض تراكم أخطاء الاختصار المتتالية برمَّتها، عبر تحريك بسيط لنقطة الانطلاق، وهو التحريك الذي لا يتأثر بمستوى الدقة المعتمدة، لكنه يظل واقعياً مع ذلك، بحيث تسهم تأثيراته الموسَّعة في تصحيح الأخطاء كلها. هكذا تحدث الأمور، وكأن الحاسوب لا يقوم بحساب المدار وفْق المعطيات المقدمة له، بل وفق معطيات أخرى قريبة جداً من الأولى، إلى درجة يستحيل معها التمييز فيما بينها رغم تباينها.

بهذا المقتضى، تُعتبر المدارات المحسوبة من طرف لاسكار بدقة تناهز 10 أرقام، وإن كانت لا تصل إلى حدود 100 رقم، بمثابة مدارات ممكنة في النظام الشمسي على مدى مليارات السنين. فهي توافق الشروط البدئية التي تُعتبر أدق من 10 أرقام وأكثر ملاءمة لمعطيات النظام المذكور، كما أنها «تقتفي أثر» المدارات المحسوبة، أي الزائفة و «تتلاءم معها» إلى حدود الرقم العاشر الدال.

يمكننا إذاً أن نحسب المدارات «الصائبة»، بالرغم

من كل الأخطاء التي يمكن ارتكابها في البداية وفي كل مرحلة من المراحل اللاحقة. والأمر المثير الذي لا يخلو من مفارقة، أن عدم استقرار الأنظمة السَّديمية هو الذي يتيح هذه الإمكانية. وهو يفسح المجال أمام إمكانيات أخرى، حيث سنتعرف لاحقاً على كيفية حساب احتمالات مختلف أنواع المدارات وعلى كيفية الاحتياط من أخطاء النمْذجة modélisation.

طبعاً، تكون مصادر الأخطاء الممكنة كثيرة، ويمكن أن تلغي مصدر عملنا برمته، في حالة إذا لم نتوافر على نتائج الاستقرار هذه. مثلاً، يُعتبر النموذج الكلاسيكي لحركات الكواكب، المرتكز على قانون نيوتن، غير دقيق تماماً. فالنموذج الذي نقرُّ بدقته اليوم، يقوم على منحنى الفضاء–الزمن. صحيح أن الفارق دقيق جداً، في ظل شروط النظام الشمسي، مع استثناء يهم كوكب عطارد الذي يقتضي «تصحيحاً نسبياً» ضمن المعادلات المتعلقة به. ومع ذلك فإن هذا الفارق، غير المدرَك في البداية، سيكبر وسيثير الشكوك حول التوقعات على المدى الطويل؛ كما يمكن أن يؤدي عدم دقة الوضعية البدئية، أو أخطاء الاختصار أثناء الحساب، إلى إعادة النظر في النتيجة النهائية.

لكن المشكلة تختلف هنا، لأن الأمر يتعلق بخطأ في النموذج وليس على مستوى المعطيات، فهو لا يهم المتغيرات بل المعادلات. وبالرغم من ذلك، نحن نحصل على النتيجة نفسها، لأن المدارات المحصَّل عليها بواسطة معادلات نيوتن، تظل قريبة من المدارات المحصل عليها بواسطة معادلات أينشتاين، في ما وراء الزمن الفلكي (أي في زمن لامتناهٍ).

المسألة تخص نتيجة استقرار بنيوي نحصل عليه مثلما نحصل على نتيجة الاستقرار الرقمي. وبيان ذلك أن المدار النسبي الذي «يقتفي أثر» المدار النيوتوني، لا ينطلق بالضبط من الشروط البدئية نفسها، بالرغم من عدم تميزه على مستوى الدقة المعتمدة. وحتى لو رغبنا مثلاً في تقدير احتمال خروج عطارد عن المنظومة الشمسية يوماً ما، فإن بإمكاننا اصطناع ذلك رقمياً. ويسمح لنا تقاطع النقط بتحديد مكان عطارد، عبر تقريب بضع مئات من الأمتار، أي أن بإمكان مركز الكوكب أن يوجد في أي مكان داخل مكعب بحجم يصل بضع مئات من الأمتار. لنسلِّمْ بالأمر. لكن علينا الآن أن نحدِّد عشوائيا نقطة انطلاق عطارد داخل المكعب، وأن نرى أين ستصل الأمور بعد 3 مليارات سنة. فلنقمْ

بالتجربة مرة أخرى، لأن ذلك لا تأثير له على مسار العملية ويقتضي فقط زمناً إضافياً في الحساب. هكذا، سيمنحنا المتوسط الإحصائي للحالات الإيجابية، أي عدد المرات التي نجد فيها الكوكب خارج مدار النظام الشمسي، مقسوماً على العدد الإجمالي للتجارب، احتمال مغادرة عطارد للنظام المذكور.

فهل نعتبر هذا الاحتمال مجرد وهم رياضي؟ وهل يرتبط عطارد بهذا الاصطناع الرقمي الخالص بمعنى ما؟ وهل بإمكاننا الزعم باحتمال مغادرته للنظام الشمسي؟ هنا أيضاً يمكننا تقديم الاعتراضات نفسها المؤسسة على عدم الاستقرار بالنسبة إلى الشروط البدئية. لكننا نتوافر هنا أيضاً على نتيجة تخص الاستقرار، فهل يعتبر المتوسط الإحصائي الذي تم تقديره بهذه الطريقة قريباً من الاحتمال الواقعي؟

وفي آخر المطاف، لولا هذه النتائج المتعلقة بالاستقرار، لما تمكنا من الثقة في الاصطناع الرقمي ؛ فبدونه لن تكون الأنظمة السَّديمية في متناول الحساب. ولا تتسم البرهنة على هذه النتائج بالبساطة، فهي تشكل أحد المكتسبات الرئيسة للنظرية الرياضية التي تطورت حول موضوع الأنظمة السَّديمية؛ ويمكن اعتبارها من

بين الحالات الحقيقية التي اكتملت فيها النظرية وبررت تطبيقها. فبفضل الاصطناع الرقمي، اكتسبنا معرفة تجريبية مكتملة حول الأنظمة المذكورة، كما دقَّقنا وعمَّقنا رؤيتنا للعالم. فإلى حد الآن، اكتفينا بالاشتغال على مستويات ومستقيمات ودوائر، لكن في المستقبل سيستخدم التلاميذ جاذب لورنز وسيبرمجون قانون نيوتن بحاسوبهم الشخصي.

تسمح لنا هذه النتائج المتعلقة بالاستقرار، كما بالتأكيد على أن الاصطناع الرقمي مقنع مثل التجريب الفيزيائي، وبأن رؤية الفضاء التي يقدمها الحاسوب صائبة.

ما هي نظرية السَّديم؟

النظريات العلمية

تشبه نظرية السَّديم الهندسة الأوقليدية، فهي ليست نظرية علمية بل مجموعة من النتائج الرياضية. ويبدو هذا الأمر مفارقاً؛ إذ ألا تعتبر النتائج الرياضية بمثابة ضمانة ضد ارتكاب الأخطاء؟ ولماذا يُرفض وضعها كنظرية علمية؟ من الواضح أن هذه الأخيرة تقدم لنا رؤية حول العالم، في حين تقدم لنا الرياضيات فكرة عن الرياضيات نفسها. ويتضمن العلم هامش الخطأ لكنه يطبَّق على الواقع المحيط، أما الرياضيات فهي صائبة بالضرورة، لكن هذا الصواب يُطبَّق على الرياضيات وحدها وليس على استعمالاتها. ونحن ننتظر من النظرية العلمية أن تعلمنا بعض الأشياء المتعلقة بالعالم المحيط بنا، مثلاً حول أحد الجوانب الفيزيائية أو البيولوجية أو الاجتماعية، ضمن هذا الواقع المتعدد الأشكال الذي نحيا وسطه. هكذا، ففي الفيزياء، تقول النظرية الغاليلية عن المكان بوجود معالم مطلقة؛ وإذا ما أرجعنا الحركات إليها فسنكتشف بأن التسارع الحاصل

بجسم ما، هو حاصل قسمة القوة المطبقة على كتلته. كما تقول نظرية نيوتن في الجاذبية إن الأجسام تنجذب تناسبياً مع كتلتها وعكسياً مع مربع المسافة الفاصلة بينها. وبتطويرنا لهذه الفكرة، نبرهن على أن كوكباً وحيداً يدور حول الشمس، ويقوم بحركة إهليلجية، وهو أمر يوافق ملاحظات كيبلر. وفي البيولوجيا تقول النظرية الداروينية إن هيئة الحيوانات ليست ثابتة؛ فالأنواع تتطور بعملية انتقاء طبيعي، تم فهمها بشكل مختلف حسب الفترات الزمنية أو المؤلفين، لكنها تمر عبر تناسل الأفراد وتحوُّل الخصائص المنقولة إلى الخلَف. وهو ما دعاه داروين بـ «الانتساب مع التحول».

تشترك كل هذه النظريات في كونها صحيحة أو خاطئة، وبتحديد أدق في تموقعها على سلم يتراوح بين ما هو صائب بشكل دقيق، وما هو خاطئ تماماً، وفي كونها تقدَّر بحسب وضعها الخاص بهذا السلم؛ وطبعاً فإن هذا التقدير قابل لإعادة النظر باستمرار. فما يميز النظرية العلمية هو خضوعها الدائم للحكم، فهي إما صحيحة أو خاطئة. ويتجاور الحُكمان معاً، لأنها لن تكون صحيحة إلا لأن بإمكانها أن تكون خاطئة. وما يضفي المصداقية على النظرية العلمية ويميزها عن

الأسطورة والدين، أو ببساطة عن أي هذيان، كونها قابلة للتكذيب والتفنيد، أي يمكن إعادة النظر فيها عن طريق التجارب. وقد بينت التجربة الشهيرة لميكلسون Michelson و مورلي Morley أن سرعة الضوء ظلت هي نفسها في كل المعالم. وبسبب ذلك، تم التخلي عن النظرية الغاليلية للمعالم المطلقة، لفائدة النظرية الأينشتاينية في النسبية الخاصة.

ولتكذيب نظرية التطور، يمكننا تشكيل عيِّنتيْن من الحيوانات من النوع نفسه، ووضعهما في شروط مناخية وبيولوجية مختلفة والتأكيد على أن الأفراد يظلون، جيلاً بعد جيل، يشبهون بعضهم بعضاً بالرغم من انفصال العيِّنتين. وقد أقرّ داروين نفسه بأن تجربة مضادة أجريت بجزر الغلاباغوس Galapagos، وتم الإقرار من خلالها بأن العيِّنات الحيوانية المعزولة منذ مدة عرفت بعض التحولات الملموسة بالمقارنة مع مثيلاتها بالأرض اليابسة.

بالمقابل، فإن الفكرة القائمة اليوم، والتي يعود تاريخها إلى 5 آلاف سنة، ومفادها أن الله خلق هذا العالم، تعتبر مُطمئنة أكثر، لأن إعادة النظر فيها غير واردة. فلا مانع من خلال هذه الفكرة أن تكون الصخور مزْدانة

بمستحثات الديناصورات حتى ولو لم تكن موجودة، وأن تخلق بجزر الغلاباغوس حيوانات مختلفة عن تلك الموجودة بالأرض اليابسة. وما دمنا لم نبتكر بعد آلة للسفر عبر الزمن، فلا يمكن لأي تجربة معقولة أن تميز بين هذا العالم وذلك الذي وُجدت به الديناصورات فعلاً. فرجل العلم يحيا داخل عالم يعتبر فيه اليقين مؤقتاً. وبالتالي، فإن عالمه هو عبارة عن مقبرة للأفكار الخاطئة وللنظريات المتجاوَزة؛ كما أن النظرية التي يتبنَّاها تظل مؤقتة في انتظار تعويضها بنظرية أفضل.

إن الحقيقة العلمية، رغم تواضعها، لا تروق للجميع. فغاليلي مثلاً، قضى أواخر حياته في السجن لأنه دافع عن أفكاره التي تبدو لنا اليوم عادية، بحيث يستعصي علينا فهم آراء من سبقوه. كما أن أفكار داروين ما زالت إلى اليوم تثير معارضة الأصوليين البروتستانت الذين يحملون مصباح محكمة التفتيش المقدسة. وفي بعض الولايات الأمريكية أصبح من اللازم تدريس معتقد الخلق بالمدارس والجامعات، إلى جانب نظرية التطور، لأن بإمكان الحقائق العلمية أن تكون مزعجة ومحرجة أحياناً.

من جهة أخرى، أصبح الاحتباس الحراري واقعاً

مؤكداً؛ فلم يعد هناك شك في تأثيره العميق على كوكبنا خلال القرن المقبل، وهو ما يتطلب اتخاذ إجراءات عاجلة. لكن، ما رأي الولايات المتحدة في ذلك؟ لقد زعمت إدارة جورج بوش بأن الدراسات العلمية ليست حاسمة، بل إن القسيس فالويل Falwell اعتبر بأن الاحتباس الحراري لا يمكنه أن يوجد، لأن الله تعالى لن يسمح بذلك. ومن السهل علينا أن نكتشف وراء ذلك مصالح اقتصادية وسياسية ستتضرَّر إذا ما أعيد النظر، بشكل أساسي، في النظام القائم الذي يدافع عنه الحلف التقليدي بين السيف (الدولة) ومرشَّة الماء المقدس (الكنيسة).

والملاحظ أن النتائج الرياضية الخالصة، مثل الهندسة الأوقليدية أو المبرْهَنة الأخيرة لفيرماط Fermat، لا تندرج في لعبة الصواب والخطأ، بالرغم من نعت مثل هذه النتائج بالنظرية في بعض الأحيان. عندما نتحدث عن نظرية الأعداد[1] أو عن نظرية غالوا Galois[2]، فإننا لا نستحضر أشياء قد تبدو غير صائبة مع مرور الزمن، أو يمكن إعادة النظر فيها بالاعتماد على تجربة معينة. ذلك أن المساواة الحسابية 2+2=4 لا تنتمي إلى نظام القانون الفيزيائي بل إلى الضرورة المنطقية. فبإمكاننا

استنباطها من نتائج رياضية أخرى مثل 1+1=2، أو من تحديد ملائم للأعداد 1، 2، 3، 4. إنها ليست صائبة باعتبارها تخبرنا عن العالم الذي نعيش فيه، بل لأنها تنسجم مع المنطق الرياضي. فهي غير قابلة للدحض، إذ لا توجد نظرية قادرة على إقناعنا بأن 5=2+2 ؛ ولا يمكن الاعتراض عليها كما لا يمكن تعديلها. وعلينا ألا نتوقع من رياضيي المستقبل، الأذكى منا، إيجاد قيمة أفضل من 4 لعملية 2+2. فالولايات الأمريكية لم تصدر تشريعاً بخصوص 2+2، كما أن مؤلف نظرية بديلة مفادها أن 2+2 يمكن ألا تساوي 4، قد يودع بكل بساطة بمستشفى المجانين.

النظريات الرياضية

تشير كلمة «نظرية» في الرياضيات إلى مجموع النتائج التي تشترك إما في كونها تطبق على المجال نفسه (نظرية الأعداد)، وإما في انتسابها إلى عبقرية شخص واحد (نظرية غالوا). وهي عبارة عن بناءات منطقية خالصة، تقتصر على استنباط النتائج الضرورية من بعض النتائج الرياضية التي تعتبر أساسية (مثل الأوليات axiomes)، لكن تطبيقها على العالم

الفيزيائي والبيولوجي أو الاجتماعي لا يندرج أبداً ضمن اهتمامها، كما لا يمكن لأي تجربة تأكيدها أو تفنيدها. بهذا المعنى، فإن البناءات المذكورة ليست نظريات علمية. فالهندسة الأوقليدية مثلاً، تستنبط النتائج الضرورية من بعض الأوليات وعددها تسع؛ من أشهرها أولية «من نقطة يمر مواز واحد لخط مستقيم معطى». وهي تخبرنا بأننا إذا قبلنا هذه الأوليات، فيتعين علينا قبول كون مربع وتر المثلث l'hypoténuse داخل مثلث قائم الزاوية، هو مجموع مربعيْ الضلعيْن الآخريْن (وهذه هي مُبرْهنة فيثاغوراس). هكذا ظلت الهندسة الأوقليدية صائبة بالضرورة، ما عدا إذا كنا قد أغفلنا خطأ في مسار هذه الهندسة على مدى أكثر من ألف سنة.

أما بخصوص تلاؤم العالم أو عدم تلاؤمه مع الهندسة المذكورة، فهذه قضية أخرى لا تهم الرياضي بل الفيزيائي. فإذا ما قمنا بواسطة كوس ومسطرة برسم مثلث قائم الزاوية على ورقة، يكون طول ضلعيْه على التوالي 3 و 4 سنتميترات ووتْره 5 سنتميترات، فإننا لن نتحقق من مبرهنة فيثاغوراس وهي: $3^2+4^2=5^2$، بل من النظرية الفيزيائية لغاليلي التي تعتبر بأن من الممكن

حساب المسافات بين النقط في الفضاء، بالاعتماد على قواعد الهندسة الأوقليدية. وإذا ما تبيَّن لنا يوماً بأن الأمر غير ذلك، فإننا لن نتخلى عن الهندسة المذكورة بل عن نظرية غاليلي. عندئذ ينبغي اعتماد هندسات أخرى لحساب المسافات بين النقط داخل الفضاء (ومعلوم أن هناك هندسات صائبة مثل الهندسة الأوقليدية وفق الأسباب المذكورة نفسها).

هذا ما حصل مع نظرية النسبية فعلاً. فقد أبانت التجربة على أننا عندما ننقل الأشياء بسرعة قريبة من سرعة الضوء، فإن تطبيق الهندسة الأوقليدية يصبح غير ممكن، وهو ما يتم التعبير عنه بصيغة غير دقيقة مفادها أن «الانتقال يقلص المسافات». طبعاً، الانتقال لا يقلص شيئاً، كل ما في الأمر أن هناك تطبيقاً لهندسة أخرى بخصوص هذه الوضعية غير هندسة أوقليدس. ومع ذلك، تظل مبرهنة فيتاغوراس دقيقة وصائبة رغم أن الواقع الفيزيائي لا يخضع لها، مثلما أن قواعد لعبة الشطرنج تبقى صائبة باستقلال عن كونك تمارس لعبة الضّامة.

هكذا تُعتبر نظرية السَّديم مثل الهندسة الأوقليدية أو نظرية الأعداد، فهي مجموعة من النتائج الرياضية

الخاصة والمستقلة عن تطبيقها أو عدم تطبيقها على ظواهر ملاحظة. إنها تكتفي باستخلاص النتائج المنطقية والضرورية من بعض الأفكار التي أدرجت في القرن السابع عشر لنمذجة الزمن. تعلّمنا هذه النظرية بأننا إذا قبلنا النماذج الرياضية المستخدمة منذ أكثر من أربعة قرون، التي سمحت لنيوتن وبوانكاري وأينشتاين بإجراء حساباتهم، فعلينا أيضاً أن نقبل إمكانية حصول الظواهر السَّديمية التي وصفناها في القسم الأول، مثل التزايد الأُسّي للفوارق ووجود جاذب غريب. كما تعلمنا كذلك أن الظواهر السَّديمية إذا حدثت، فإن نتائجها تكون أحياناً غير متوقعة، رغم كونها منطقية وضرورية. وقد سبق أن تحدثنا عن مختلف أشكال الاستقرار الموجودة بالأنظمة السَّديمية التي تعتبر غير مستقرة بالنظر للشروط البدئية، وتسمح بإجراء اصطناع رقمي عليها.

وفي جميع الأحوال، فإن نظرية السَّديم تعرف تطوراً في اتجاهات أخرى لم نشر إليها؛ وكمثال على ذلك، هناك سعي لمعرفة ما إذا كانت بعض الأنظمة المعطاة، سديمية أو غير سديمية، وما إذا كانت كل الأنظمة السَّديمية قابلة للتصنيف في خانات متمايزة.

لهذا، تعتبر نظرية السَّديم أولاً وقبل كل شيء، بمثابة خطوة إضافية في مجال التقدم المستمر للرياضيات؛ ولا يمكن لعالم رياضي مثلي إلا أن يصفق لهذا الأمر. فكم من مرة وُجهت إليَّ أسئلة مقلقة من قبيل: هل أنت عالم رياضي؟ وهل تقوم بالبحث في هذا المجال؟ وكيف يمكن أن تكتشف شيئاً جديداً في الرياضيات؟ وكأن مبرهَنة طاليس أو مسألة تساوي المثلثات هما آخر ما توصل إليه العلم الرياضي، أو أننا نكتفي بتكرار الأشياء نفسها منذ ألفي سنة. وتسهم كتب تاريخ الرياضيات في تزكية هذا الانطباع، حيث تتوقف في الغالب عند القرن التاسع عشر وتسعى، بشكل مؤسف، إلى تفضيل نظرية الأعداد، بذريعة أن هذه الموضوعات هي الأقرب إلى فهم غير المختصين.

في الواقع، فإن الرياضيات علم حي بشكل عجيب، إذ يحدث التقدم في إطارها بوتيرة سريعة جداً. ومن الناحية العملية، فإن كل النتائج المهمة اليوم اكتشفت في القرن العشرين؛ أما النتائج المألوفة والمستخدمة من قِبل الباحثين، فإنها تتقادم بعد خمس سنوات. هكذا، يمكن لمقالة باحث في الرياضيات أن تستشهد بمقالات سابقة معتمدة، يتراوح عددها بين 20 و 50 مقالة. والملاحظ

أن 10٪ فقط من هذه المقالات يتجاوز تاريخ صدورها الخمس سنوات؛ ومن النادر أن تتجاوز إحدى المقالات المستشهد بها العشرين سنة.

من هذا المنظور، يعتبر الرياضيون نظرية السَّديم مثل غيرها من النظريات التي ظهرت في القرن العشرين وعرفت تقدماً متزايداً، تجلى في إصدار عشرات الكتب ومئات المقالات المتخصصة في كل سنة. وتبرز قيمتها في الاهتمام الذي تثيره خارج حدود الرياضيات، لدى العلماء من تخصصات أخرى وحتى لدى الجمهور العريض (ومن بينه مقتني هذا الكتاب). صحيح أن النتائج الرياضية لا تُعرف كثيراً خارج دائرة المهتمين، وفي الحالات النادرة التي يحصل فيها ذلك، فإنها تثير لدى العارفين نوعاً من الحذر بدل الحماس. ونحن نتذكر نظرية الكوارث التي قوبلت بالكثير من التحفظ في الأوساط الرياضية.

طبعاً، تكتسي تسمية الأشياء أهمية كبيرة، ونخشى أن يكون الاهتمام الذي أثارته نظرية السَّديم مثلاً، قائماً على سوء فهم، بحيث يبحث فيها عن نظرية في الاختلال العام، بل وفي الفوضى المستمرة، وهو ما يؤدي إلى خيبة أمل كبيرة ولن يساعد على تقدم العلم.

لكننا سنرى بأن هناك أسباباً وجيهة للاهتمام بنظرية السَّديم وبأن ثقة الجمهور ستكون في محلها هذه المرة. وفي اعتقادي، فإن التأثير الكبير لهذه النظرية سيظهر في المستقبل ولن يقتصر على مجال الرياضيات، بل سيشمل مجمل العلوم.

النماذج والنمذجة

لنجيب على السؤال «لماذا؟»، علينا أن نستحضر بنية النظريات العلمية، على الأقل في مجال الفيزياء. وتتألف هذه النظريات من جزءين متقابلين، إلى حد الساعة، لأننا سنرى أن بإمكان نظرية السَّديم تغيير هذه البنية. ثمة من جهة نظام فيزيائي، ومن جهة أخرى نموذج رياضي. وهناك تقابل غريب بينهما، لأن حالة النظام توصف بقيمة بعض متغيرات النموذج، كما أن المنطق الداخلي للنموذج الرياضي ملزم للنظام الفيزيائي. وتشكل النظرية النيوتونية النموذج الأصل prototype لكل النظريات الفيزيائية. فمن جانب، لدينا النظام الشمسي، حيث توجد الشمس بمركزه، أما باقي الأجسام السماوية، من كواكب ونيازك ومذنَّبات فتدور حولها. ومن جانب آخر، لدينا نقط

داخل فضاء أقليدي ثلاثي الأبعاد ومعادلات تحدد حركتها. وبينهما، يوجد أمر عجيب قائم باستمرار، هو تطابق الحركة الرياضية لهذه النقط المجردة داخل الفضاء مع الحركة الملاحظة للأجسام السماوية بالفضاء المحسوس. بالتالي، يمكننا توقِّع وضعية الكواكب بحساب نتائج معادلات نيوتن. وقد أصبح هذا الأمر العجيب مألوفاً إلى درجة أننا لم نعد نفكر فيه؛ ومع ذلك، فهو يظل غير مفهوم، على الأقل بالنسبة لكاتب هذه السطور.

وكيفما كان الحال، فإن مسعى النمْذجة المذكور يشكل أساس العلم الحديث. فقد تم التوصل في الفيزياء الحديثة إلى نماذج لا ندري هل نُعجب بدقتها الرياضية أم بقوة توقعاتها. ومعلوم أن علوم الأحياء أو الاقتصاد تطورت أيضاً وفق هذه النماذج؛ ورغم أنها أقل دقة وقوة، إلا أنها تشكل مراحل مهمة في تطور العلم. طبعاً، هذه النماذج كلها تتنوع بتنوع الوضعيات التي تغطيها وبحسب ما تسمح به حالة الرياضيات. لكن باستطاعتنا ترتيبها داخل صنفين كبيرين؛ فهي إما اتفاقية stochastiques أو حتمية déterministes، ويتوقّف ذلك على اعتمادها أو عدم اعتمادها على الصدفة.

هكذا يعتبر النموذج اتفاقياً، إذا ما سَمح للفرد في لحظة معينة برمي قطع النرد واستخدم النتيجة المحصل عليها. وفي الفيزياء الحديثة، يتم حساب الاحتمالات، مثل احتمال مرور الإلكترون من مدار ذري إلى آخر واحتمال تحطم النواة واحتمال توليد الفراغ لزوج يسمى الجزيْء المضاد. أما بخصوص معرفة ما إذا كانت الظاهرة ستقع فعلاً وما إذا كان مستوى طاقة الإلكترون سيتغير، وما إذا كانت النواة ستتحطم أو ما إذا كنا سنلاحظ وجود البوزيترون positron (وهو ذو شحنة إيجابية تعادل كتلته الإلكترون السلبي)، فإننا لا ندري شيئاً من ذلك، لأن كل هذه الأمور تتوقف على قرعة عشوائية لا دخل للفيزيائي فيها.

ذلك هو النموذج الأصل الممثل للنموذج الاتفاقي الذي كان يزعج أينشتاين كثيراً، حيث تساءل وبحق عن رامي قطع النرد. صحيح أن الفيزياء الكلاسيكية برمتها عوَّدتنا بالأحرى على النماذج الحتمية، تلك التي لا يرمي فيها أي أحد بقطع النرْد، والتي التزمت الفيزياء النسبية في ما يخصها بالمثال النيوتوني. في النموذج الحتمي، يتحدَّد تطور النموذج تماماً بحالته الراهنة، فإذا ما عرفنا حلّ المعادلات، فإننا سنتمكن من توقُّع

الحالات المستقبلية وإعادة تشكيل الحالات الماضية.

وأول تأثير لنظرية السَّديم (وهو في نظري الأقل أهمية) يتمثل في توسيع دائرة النماذج المتوافرة لعرض الظواهر غير المنتظمة أو الاحتمالية. وإلى حد الآن، فإن مواجهة الفيزيائي والبيولوجي أو الاقتصادي لظاهرة من هذا النوع، تدفعهم إلى البحث عن نموذج اتفاقي، من منطلق أن النموذج الحتمي يؤدي بالضرورة إلى تصرف منتظم وقابل للتوقع؛ وذلك في تناقض مع الظاهرة التي يسعون إلى نمذجتها. وإذا كانت نظرية السَّديم تبدو بهذه الأهمية للباحثين في هذه التخصصات، فذلك راجع إلى كونها تفتح أمامهم إمكانية أخرى، وهي اقتراح نموذج حتمي لكنه سديمي.

يمكننا أن نأمل إذاً في إبراز النظام الفيزيائي من دون استدعاء *لمنقذ للموقف deus ex machina* وهو رامي قطع النرد، مثلما يحدث في النماذج الاتفاقية. وبالعودة إلى دمية حي بيرطو، نستطيع بكل تأكيد اقتراح نموذج اتفاقي، أي تقدير تكرار ظهور الأرقام من 1 إلى 5 في مختلف بروتوكولات التجربة، كما يمكننا أن نتصوَّر بأن هذه الأرقام سُحبت وفق الاحتمالات المذكورة؛ لكن من الأفضل فتح الصندوق ومتابعة اشتغال الآلية مباشرة!

لنقدّم مثالاً آخر أكثر راهنية. فمن المعلوم أن إحدى الظواهر الأساسية للاقتصاد تتمثل في وجود دورات للنشاط الاقتصادي، تتناوب فيها فترات الانكماش وفترات الازدهار. وهذه الفترات معلنة بهذا القدر أو ذاك (فكلنا نستحضر أزمة سنة 1929 الكبرى)، وهي تستمر مدة طويلة أو قصيرة ولكنها تحصل دائماً بالتناوب (مثلاً، عرفت أوروبا 30 سنة من الازدهار المستمر بعد الحرب العالمية الثانية). وتثبت التجربة على أن هذه الفترات غير متوقعة، بل قد لا نستطيع معرفة ما إذا كان تقلص النشاط مؤقتاً أو أنه مؤشر على الانكماش وعلى بداية دورة جديدة. لكنها ليست احتمالية بشكل تام، لأن التحليلات التاريخية تكشف على العكس من ذلك ترابطاً منطقياً بين توقعات الفاعلين وسلوكهم، وتبين أهمية بعض السياسات في هذا الاتجاه أو ذاك. ولا شك في أن تفسير هذه الدورات، هو من بين المشكلات الرئيسة في علم الاقتصاد. فهل يتعيَّن البحث عن أسبابها في النشاط الداخلي للاقتصاد؟ أم ينبغي إرجاعها إلى عوامل خارجية متعلقة بعدم كفاءة الحاكمين أو بالتقدم الصناعي؟ إلى حد الآن، تم تفضيل النوع الثاني من التفسير. فبفعل الخاصية غير المنتظمة

للدورات، سعى الدارسون إلى تمثيلها بنماذج اتفاقية، أي عملوا على تفسير هذه الدورات بصدمات خارجية من طبيعة احتمالية، يخضع لها الاقتصاد.

وعلى سبيل المثال، فإن نماذج عديدة استحضرت الابتكار التكنولوجي، معتبرة بأن كل ابتكار جديد يؤدي إلى قفزة نوعية وإلى زيادة قوية في الإنتاج يكون لها تأثيرها على الاقتصاد برمته (وهذه هي الصدمة التكنولوجية). غير أن نظرية السَّديم فتحت إمكانيات جديدة للتفسير، وهو ما أدى لاحقاً إلى ازدهار النماذج الحتمية التي تربط الدورات الاقتصادية بتوقعات الفاعلين (مستهلكين ومنتجين) وبتناوب الأجيال، بل وبسعي مخطِّط محب لمجتمعه، إلى تحقيق إنتاج أفضل. وتشترك كل هذه النماذج في اعتبار الاقتصاد نظاماً سديمياً شبيهاً بالنظام الذي وصفناه عند نهاية القسم الأول من هذا الكتاب. فالدورات هي نتيجة من بين نتائج هذه الفرضية التي نتوافّر على نماذج عديدة منها، وأعتقد بأننا لن نتوقف عن اسكتشافها.

وبشكل عام، فإن نظرية السَّديم توسع بشكل كبير إمكانيات استخدام النماذج الحتمية. ويبدو أن استخدامها قد انحصر إلى حد الآن في الأنظمة القابلة

للتوقع تماماً، والكاملة الشفافية في نظر العالِم القادر على سبر أغوار الماضي السحيق، كما المستقبلَ البعيد على السواء. وتلك هي رؤية لابلاس. فبمجرد اعتبار العالم خاضعاً لقانون نيوتن، استخلص هذا العالم بأن كل شيء حتمي الآن، وبأن الذكاء الذي سيعرف الوضعيات والسرعة الدقيقة لكل جزيْء في الكون، سيتمكن من حساب الماضي كله والمستقبل كله. فكل شيء مكتوب اليوم في الكتاب الكبير للكون، ويكفي معرفة قراءته.

هكذا، بإمكان نظرية السَّديم أن تحررنا من هذا الغطاء الخانق ومن هذا الكون المنغلق الذي لا يمكن أن يحدث فيه أي شيء ولا يوجد فيه ما هو مجهول أو جديد. فالرؤية التي تقترحها علينا مختلفة تماماً، وهي مستوحاة من جاذب لورنز. صحيح أن النماذج الحتمية، سواء تعلق الأمر بنموذج نيوتن أو أينشتاين، هي المحدِّدة للكون. لكن ذلك لا يعني أن المستقبل وكذلك الماضي قابلان للحساب؛ فقد تعرفنا الآن على عدة أمثلة لأنظمة سديمية سمحت لنا بفهم كيف أن الزمن الفلكي يضع حدوداً صارمة أمام كل توقُّع.

لا يعني ذلك أيضاً أننا لن نتمكَّن من قول أي شيء عند تجاوز الزمن المذكور. فقد أدركنا، بفضل نظام

لورنز، وجود جاذب غريب يتجه النظام صوبه ولا يفارقه بطبيعة الحال. فنحن نعلم مكان لقائنا من خلال معرفتنا بمنطق النظام؛ ويوجد هذا المكان على الجاذب الغريب. بذلك، أصبح بإمكاننا في الأخير القيام بتوقع يقيني في ما وراء الزمن الفلكي، وهو أن النظام سيكون قائماً فوق الجاذب المذكور. فأن نقترح نموذجاً حتمياً للكون، معناه التأكيد على خضوع هذا الأخير لقوانين صارمة مُلزمة لتطوره على مدى وجوده، بحيث لا يمكنه مغادرة جاذبه الغريب. وكما رأينا فإن ذلك يعني، من منظور فيزيائي، بأن كل الحالات الممكنة نظرياً ليست جميعها قابلة للتحقق عملياً، وأن الحالات الطبيعية التي يمكنها أن تظهر خلال تطور الكون، يجب أن تتوافر على مميزات خاصة جداً. هكذا ظهرت قوانين الفيزياء بوصفها مجموعة من العلاقات المميَّزة للحالات الطبيعية، ضمن الحالات الممكنة كلها. فبإمكان جزيئات الغاز التي تشغل حيزاً معيناً أن تنتشر مبدئياً بطرق مختلفة، وباستطاعتنا مثلاً أن نتصور تكدُّسها في زاوية، حيث ينجم عنه ضغط عال جداً. بالمقابل، يظل الجزء الأكبر من المكان شاغراً ويستقر في الفراغ المطلق مؤقتاً. لكن، إذا كانت مثل هذه الحالة ممكنة نظرياً،

فإنها تُعتبر غير طبيعية مع ذلك، بمعنى أن النظام سيبتعد عنها تلقائياً وبسرعة باتجاه الحالة الطبيعية، وذلكم هو التوازن الحراري الدينامي الذي يكون الضغط والحرارة بمقتضاه منتظمين داخل الوعاء ويرتبطان بالحجم، مثلما تبين من خلال قانون ماريوط.

بيْد أن اقتراح نموذج حتمي، وهذه هي أول مساهمة لنظرية السَّديم، ترك حيزاً للصدفة وبعداً لغير المتوقَّع. صحيح أن النظام يظل مشدوداً إلى جاذبه الغريب، لكننا لا ندرك حركته على هذا الجاذب. وبتعبير أدق، فإن الزمن الخصوصي T يضع حداً أمام إمكانيات التوقع. وللتذكير، فإن الأمر يتعلق بالزمن اللازم كي يتم ضرب الخطأ في التموقع في أو ضرب أو التشويش على الحركة أيضاً في عشرة. وبخصوص المدة الأدنى من T، فإن بإمكاننا تتبع النظام حسابياً من دون مشاكل. أما بخصوص المدة الأعلى من $10\ T$، فإننا نفقد أثر هذا النظام تماماً؛ وكل ما نستطيع قوله (وهذا تدقيق مهم)، هو أنه موجود في موضع ما على الجاذب الغريب. لكن أين يوجد هذا الموضع بالضبط؟ ذلك ما نجهله. يا له من تجميع رائع ودقيق للصدفة وللضرورة! فبعملية واحدة قمنا بحل عدد كبير من المشكلات الزائفة، المتعلقة

بالحرية الإنسانية داخل كون حتمي. ولم نعد نرى، كما كان لابّلاس يرى سماء صافية منفتحة على أفق لا متناه، يعطي صفاؤها الانطباع بإمكانية ملامستها. ولم نعد نجد أنفسنا أيضاً أمام سماء مغطاة وغارقة في ضباب يمنعنا من الرؤية ويحجب عنا كل أفق. فما نراه يتضمن الأمرين معاً، مثل سماء تمطر لكن عواصفها تسمح مع ذلك ببعض الانفراج وبالنفاذ إلى آفاق بعيدة مشمسة.

الحساب يوجد بين النموذج والواقع

رغم عمق هذه الرؤية وجماليتها، إلا أنها لا تعتبر في نظرنا أهم إسهام لنظرية السَّديم. فقد سبق أن أشرنا إلى الهامش الدقيق الذي يفصل بين الصفر الرياضي للاشيء تقريباً والدقة المطلقة لأفضل تقريب. ويتسرَّب هذا الهامش بين النموذج الرياضي والنظام الفيزيائي الذي يمثله. والملاحظ أن الهامش المذكور ظل غير مدرَك على مدى أربعة قرون، لأن وسائل الحساب المتوافرة خلال نلك الفترة كانت تحدُّ بشكل صارم من استخدام النماذج الحتمية ومن مواجهتها للواقع الفيزيائي. وبفضل نظرية السَّديم تم التعرّف أخيراً على هذا الهامش، ومن المؤكد أن تطور العلم في المستقبل

سيمنحه أهمية أكبر. فبين النموذج الرياضي والواقع الفيزيائي، تمَّ اكتشاف حيز وسيط هو حيز الحساب. لنوضِّح الأمر: قبل ابتكار الحواسيب كانت الحسابات الممكنة تجري باستعمال الورق وقلم الرصاص والممحاة. وباستثناء حالات نادرة سنعود إليها فإن المعادلات الخطية هي التي كانت ممكنة الحل، مع العلم أنه يوجد في الطبيعة عدد من الأنظمة المحددة بهذا النوع من المعادلات. وكانت هذه الأنظمة المسماة خطية تتصرف بشكل بسيط جداً، فهي لم تكن سديمية كما أن مداراتها كانت متوقعة وحركاتها كانت منتظمة. وإلى حدود سنة 1950، كانت هي الوحيدة التي يمكن حساب مداراتها ودراسة حركتها؛ وطبعاً فإن العلوم ركزت اهتمامها عليها، بحيث سنعاين على مدى أربعة قرون تطور العديد من النماذج الخطية لمختلف الظواهر، من الفيزياء إلى الاقتصاد. وقد استُخدمت هذه النماذج لدراسة أنظمة سديمية، مثل الأرصاد الجوية، لأن النموذج الصائب يتضمن معادلات غير خطية لا يمكن حلها.

ونظراً لعدم التمكن من استعمال النموذج الصائب المذكور، تم بناء نماذج خطية معقدة أكثر فأكثر، تقترب

تدريجياً من النظام المعني، مثلما عمل بطليموس على محاكاة الحركة الظاهرة للكواكب، حيث جعلها تدور حول الأرض وفْق مدارات معقدة حصل عليها بالجمع بين الحركات الدائرية والمنتظمة. والحال أن هذه التقريبات الخطية تقدم فكرة مغلوطة عن النموذج الحقيقي، مثلما قدمت البناءات الغريبة لبطليموس فكرة مغلوطة عن البساطة الرائعة للحركة الإهليلجية حول الشمس كمركز.

باختصار، إن مفهوم النموذج الحتمي لم يكن، وإلى بداية القرن العشرين، متميزاً عن مفهوم النموذج الخطي. وهو ما يفسر مثلاً خطأ لابلاس. فقد عمل هذا الأخير، مثلما قام العلماء الذين جاؤوا بعده، ببناء نموذج خطي دقيق جداً لتمثيل النظام الشمسي. وقد اعتقد هذا العالم بأن خصائص نموذجه هي خصائص النظام المذكور، وبالتالي فإن هذا الأخير يتسم بالاستقرار. والحال أن نموذجه كان تقريبياً فقط لأنه كان خطياً، بينما يُعتبر النظام غير خطي. ونحن نعلم اليوم أن التقريب يفقد صلاحيته عند تجاوزه للزمن الفلكي الذي يقدَّر بحوالي 100 مليون سنة. وبطبيعة الحال فإن لابلاس لم يكن باستطاعته معرفة هذا الأمر، لأنه لم يكن يتوافر

على وسائل إجراء حسابات مباشرة على النموذج غير الخطي ومعرفة نوعية تقريبه (مع التأكيد على أن تقريبه كان جيداً، وفْق السلم الإنساني و«بالوسائل المتاحة»).

كان من اللازم إذاً انتظار القرن العشرين لكي نفهم بأن النماذج غير الخطية تتوافر على خصائص مختلفة تماماً عن النماذج الخطية. فقد انفتح القرن على الكتاب المهم لبوانكاري وعنوانه: *المناهج الجديدة لعلم حركات الكواكب*؛ حيث بين هذا العالم كيف أن النماذج الخطية التي استخدمها العلماء الذين سبقوه لن تتمكن أبداً، رغم تطور وسائلها، من تقديم فكرة صائبة عن حركة مدارات الكواكب على المدى الطويل؛ وكيف أن بإمكان النموذج غير الخطي أن يتضمن مدارات معقدة، بشكل لم يسبق معرفته من قبل.

ومع نهاية القرن العشرين، قدمت نظرية السَّديم تأكيدات واضحة لحدس بوانكاري، حيث أصبحت معرفتنا بالنماذج غير الخطية تعتمد على العديد من النتائج التجريبية وعلى الاصطناع الرقمي والمبرهنات الرياضية. في غضون ذلك، حدثت الثورة المعلوماتية التي سمحت أخيراً بحساب حلول المعادلات غير الخطية وتمثيلها بيانياً. ولولا هذه العمليات، لبقينا

نجهل وجود جاذب لورنز والخاصية السَّديمية للنظام الشمسي.

هكذا أصبحت النماذج غير الخطية قابلة أخيراً للاستعمال بفضل الحواسيب. فالاصطناع الرقمي كشف لنا عن خصائصها المختلفة تماماً عن خصائص الأنظمة الخطية، وهو ما أكده لنا التحليل الرياضي. وقد تولدت نظرية السَّديم عن هذه المواجهة بين الحاسوب والعالم الرياضي. فالأول يكشف للثاني الظواهر التي يتعيَّن عليه دراستها، وهذا الأخير يبرز حدود الأول (الحاسوب). ففي النظام السَّديمي، لا تكتسي بعض الحسابات أي دلالة فيزيائية. مثلاً، يمكننا أن نطلب من حواسيب الأرصاد الجوية تزويدنا بحالة الطقس المتوقعة على مدى سنتين بباريس. وباستطاعة هذه الحواسيب منحنا الجواب إذا ما تركناها تشتغل لمدة طويلة، لكن لا أحد يضمن بأن هذا الجواب المحسوب سيكون أفضل من جوابي الذي استنتجته من حساب المعادلات الموسمية لأحوال الطقس.

إننا نعيش بداية ثورة على مستوى تصور النظريات العلمية. فمن الآن فصاعداً، لن يصبح التقابل بين الواقع الفيزيائي والنموذج الرياضي مباشراً، لأنه يقتضي

استخدام الحساب. ولم يعد الآن مسموحاً القول إن المعادلة كذا تمثل الظاهرة كذا؛ بل يجب أن نقول إن النظام سديمي وزمنه الفلكي هو كذا، وعليكم أن تعلموا أننا إذا تجاوزنا هذا الزمن، فإن بعض الحسابات لن تمثل شيئاً؛ وإذا رغبتم في حساب كمية محددة، فعليكم استعمال طريقة معينة بدل أخرى. وبعبارة أخرى، لا يمكننا الإعلان عن نظرية علمية من دون إبراز ما هو قابل وما هو غير قابل للحساب ضمن هذه النظرية ومن دون الإشارة في كل حالة إلى وسائل الحساب المتوافرة. فنحن نعلم بأن للنظريات العلمية حدوداً مادية بخصوص صلاحيتها؛ وعلى سبيل المثال فإن الميكانيكا الكلاسيكية تُحَدُّ، من جهة، بالميكانيكا الكوانتية (الكمية)، ومن جهة أخرى، بالميكانيكا النسبية. ويجب من الآن فصاعداً أن نتعود أيضاً على الحدود الرقمية.

وأعتقد بأن هذه الثورة ستتسع لتشمل أيضاً تدريس الرياضيات، بحيث ستكتسي المشكلات المرتبطة بالحساب أهمية كبيرة. وكمثال على ذلك، نحن نعلّم التلاميذ حل معادلة جبرية من الدرجة الثانية: $ax^2 + bx + c = 0$ بتعليمهم الصيغة الشهيرة التالية:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{(b^2 - 4ac)}}{2a}$$

ألم يحن الوقت بعد هذه القرون التي مرت كلها، للتأكيد على أن هذا الحل ليس صائباً؟ ففي آخر المطاف، كيف نحسب هذا الجذر المربع؟ وإذا ما أردنا مثلاً حل المعادلة التالية: $x^2 + 4x - 3 = 0$ ، فإننا سنلجأ إلى المعادلة التالية:

$$x = -2 \pm \sqrt{7}$$

وهذه مشكلة، إذ ينبغي حل المعادلة: $x^2 - 7 = 0$. فاقتران الجذر المربع للعدد $\sqrt{7}$ بالحل، لا يعني أننا نتقن حسابه. أما إذا حاولنا البحث عن قيمته باعتماد جدول أو آلة حسابية فذلك يعني التغاضي عن الصعوبة والارتكاز على حساب أنجز من قبل. لكن من الذي أنجزه؟ وبأي طريقة؟ تلك هي المسألة. فكل ما نقوم به هو إرجاع معادلة من الدرجة الثانية إلى أخرى. ولا يعني ذلك «حل» المعادلة، لأننا إذا ما بقينا عند هذا الحد فسنقدم للتلاميذ فكرة مغلوطة عن ماهية الرياضيات وما يُنتظر منها؛ ذلك أن حل المعادلة يستدعي القدرة على حساب حلولها، أي منحها قيمها بالدقة المطلوبة. وهنا تبدأ المشكلات المهمة فعلاً.

وفي الحقيقة، فإن الطرق المستعملة لحساب قيم رقمية مثل الجذر المربع للعدد 7، هي إجراءات لتحسين قيمة تقريبية. إذ نحن ننطلق من قيمة بدئية، ولتكن هي 3 مثلاً، ثم نطبق الإجراء مرة أولى وثانية وثالثة الخ... وإذا ما أردنا الحصول على 9 أرقام عشرية، فإننا نوقف الإجراء عندما يمنحنا على التوالي عددين متطابقين في العشرية التاسعة. وهنا تتبادر إلى الذهن عدة أسئلة من قبيل: هل تصل الطريقة المتبعة دائماً إلى نتيجة؟ وهل بإمكاننا حساب الحلين معاً بهذه الطريقة؟ هنا سنجد أنفسنا أمام مجال قريب جداً من التطبيق، حيث يمكن للحاسوب أن يكون عوناً لنا لإبراز المشكلات وصياغة تصور حدسي. لكن الأسئلة المطروحة تظل دقيقة مع ذلك، وتسمح بمعالجات رياضية مهمة جداً. ويكفي أن نوسّع الإطار بعض الشيء وأن نشتغل في مستوى معقد، أو بمعادلات من درجات أعلى، لكي يصبح إجراء الحساب سديمياً ويولّد متواليات من القيم المتنافرة، بدل الاتجاه ببساطة نحو الحل.

لقد تساءل الفيزيائي داوود رويل David Ruelle، في مقالة شهيرة، عما إذا كانت الرياضيات التي ابتكرناها طبيعية، وهل باستطاعة الكائنات الخضراء

الصغيرة التي تعيش بكوكب يدور حول ثلاث شموس حمراء، اكتسبت من العالم الفيزيائي تجربة مخالفة تماماً لتجربتنا، تطوير الرياضيات نفسها؟

إننا لن نعرف ذلك أبداً. لكن ما يحدث الآن هو بمثابة تجربة مثيلة. فقوة الحساب الذي أصبح في متناول الإنسان غيرت عالمه؛ ذلك أنها غيَّرت بيئته ومجتمعاته وعلمه كما غيرته هو أيضاً. وبهذا المقتضى، تعتبر نظرية السَّديم هي البداية لا النهاية.

الهوامش

1) يتعلق الأمر بدراسة توزيع الأعداد الأولية.

2) تتعلق بدراسة جذور المعادلات الجبرية انطلاقاً من أعمال نيلز أبيل Niels Abel (1802 – 1829) وإيفاريست غالوا Evariste Galois (1811 – 1832).

الملاحق

1) ثبت بالمراجع

المؤلفات

1) Buzzi, J., *Chaos et stabilité*, Le Pommier, 2005.

وهذا العمل موجه للراغبين في تعميق معلوماتهم في الرياضيات.

2) Chabert, J. – L. & Chemla, K., Dahan Dalmedico, A. (dir.), *Chaos et déterminisme*, coll. Points sciences, Le Seuil, 1992.

يتضمن هذا الكتاب نقاشاً كاملاً وسجالاً حامياً حول الموضوع.

3) Chrichton, M., *Le Parc jurassique*, Laffont, 1992.

وهو كتاب ممتاز في الخيال العلمي، يعبر عن وجهة نظر شخصية حول عدم الاستقرار بالنسبة للشروط البدئية.

4) Ekeland, I., *Le Calcul, l'imprévu*, Le Seuil, 1984.

5) Ekeland, I., *Au hasard*, Le Seuil, 1991.

6) Gleick, J., *La théorie du chaos: vers une nouvelle science*, Coll. Champs, Flammarion, 1991. (édition originale, Viking Press, 1987).

وهو تعميم جيد للموضوع.

7) Morrison, P. & P., *Les Puissances de dix*, coll. L'Univers des sciences, Pour la science, Belin, 2000.

8) *L'ordre du chaos*, Collectif, Coll., Bibliothèque pour la science, Pour la science, 1992.

9) Poincaré, H., *La Science et l'Hypothèse*, Coll. Champs, Flammarion, 1968.

10) Saatdjian, E & Chassaing, M. I., Midoux, N. et andré J. C., *Sur le chaos lagrangien dans une cuve elliptique*, J. PhysIIIFrance5, 1995, pp. 175 – 196. http://www.edpsciences.org/articles/jp3/abs/1995/02/jp3v5p175.html.

ويتعلق الأمر هنا بتطبيق فيزيائي مهم لنظرية السَّديم حول كيفية خلط السوائل اللزجة جداً.

في الشبكة العنكبوتية:

– *جاذب لورنز :*

http://astronomy.swin.edu.au/-pbourke/fractals/lorenz/

ويتضمن هذا الموقع صوراً جميلة.

http://www.wam.umd.edu/-petersd/lorenz.html

http://www.sat.t.u.tokyo.ac.jp/-hideyuki/java/Attract.html

http://www.geom.uiuc.edu/-worfolk/apps/Lorenz/

موقع للصور المتحركة.

نماذج أخرى للجاذب الغريب :

http://www-chaos.umd.edu/gallery.html

http://hypertextbook.com/chaos21shtml

وبإمكانكم إيجاد مواقع أخرى أثناء استعمال محركات البحث المفضلة لديكم.

2) إحالات على الكتاب وعلى المراجع

– الصفحة 11:

Morrison, P. et P., *Powers of ten*, Scientific American Libray, 198. Film: Powers of ten, réalisé par l'agence Charles & Ray Eames pour IBM, 1977, Pyramid Films, PO Box 1048, Santa Monica, Calif. Version française, Les Puissances dix, 2000, Belin.

– الصفحة 14:

Newton, I, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, J. Gabay, 1990.

– الصفحة 17:

Sussman, G. J. & Wisdom, J., *Numerical Evidence That the Motion of Pluti is Chaotic*, Science, vol., 241, 1988.

– الصفحة 17:

Laskar, J., A Numerical Experiment on the Chaotic Behaviour of the Solar System, *Nature*, vol. 338, 1989.

– الصفحة 23:

Poincaré, H., *Science et méthode*.

– الصفحة 56:

Poincaré H., *Les Méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, Ed. A. Blanchard, 1987.

– الصفحة 58:

Ruelle, D., Are Our Mathematics Natural?, *Bulletin of American Mathematical Society*, vol. 19, 1988.

نبذة عن المؤلف:

إيفار إيكلاند، عالم فرنسي من مواليد سنة 1944. عمل رئيساً لجامعة باريس–دوفين من سنة 1989 إلى سنة 1994، ويعمل حالياً أستاذاً للرياضيات وللاقتصاد بجامعة كولومبيا البريطانية بفانكوفر. وقد اشتغل على الديناميكا والهندسة وعلى المشكلات الرياضية المرتبطة بالاقتصاد والمالية.

وبفضل تعميمه للمعارف العلمية حصل على جوائز عديدة. وهو عضو بأكاديمية العلوم بالنرويج ويشغل كرسي الأبحاث بكندا.

نبذة عن المترجم:

عزالدين الخطابي من مواليد 1952، تابع تكويناً فلسفياً وسوسيولوجياً. وهو حائز على الدكتوراه في الاثنولوجيا من جامعة نيس بفرنسا. يعمل أستاذاً باحثاً بجامعة المولى إسماعيل بمكناس، وأصدر العديد من المؤلفات في مجالات التربية والفلسفة والاجتماع، كما ترجم عدة مؤلفات لمفكرين وفلاسفة غربيين أمثال: جاك دريدا وجيل دولوز ويورغن هابرماس وإيمانويل لفيناس وغيرهم.

السَّـديم

تسمح نظرية السديم بوصف الأنظمة غير المستقرة، مثل حركات الكواكب والتقلبات المناخية والدورات الاقتصادية. والمسألة الأساسية التي أثارها إيفار إيكلاند في هذا الكتاب هي: هل هناك إمكانية لحساب مدارات نظام سديمي؟ وقد مكّن الجواب على هذا السؤال من الانفتاح على قضايا راهنة يواجهها العلماء وتتمثل خصوصاً في علاقة الرياضيات بالحواسيب ودور هذه الأخيرة في تطوير العلوم الحقة من أجل فهم أدق للظواهر المختلفة.

وإذا ما أردنا إبراز المبادئ والمرتكزات التي اعتمدها المؤلف لمعالجة هذا الموضوع، فسنقول إن نظرية السديم أعادت النظر في مفهوم اليقين المقترن بنظريات نيوتن ولابلاس اللذين اعتبرا العالم خاضعاً لحتمية مطلقة وقابلاً للحساب.

وبدل ذلك، ستعتمد هذه النظرية على منجزات علماء مثل بوانكاري ولورنز، كما ستستثمر الإمكانيات العلمية والتقنية التي يوفرها الحاسوب، لإبراز الخاصية السديمية للظواهر (الفيزيائية والاقتصادية والمناخية إلخ...).

كلمة
KALIMA

هيئة أبوظبي للسياحة والثقافة
ABU DHABI TOURISM & CULTURE AUTHORITY