

Les pratiques variables de l'écriture : le cas des marchands assyriens

S'il est facile d'enfoncer un stylet dans l'argile fraîche pour former des signes en forme de coin, la rédaction de textes littéraires, de recueils divinatoire ou la résolution de problèmes mathématiques nécessitaient des connaissances approfondies dont l'acquisition se faisait en suivant les trois niveaux du cursus scolaire : élémentaire, intermédiaire, avancé.

La plupart des élèves arrêtaient leurs études à la fin du niveau élémentaire, celui au cours duquel ils avaient mémorisé des listes de mots, des tables métrologiques et numériques. Ils étaient alors capables de rédiger de courts textes et d'effectuer des calculs simples.

En outre, l'apprentissage de l'écriture et du calcul, chez un maître ou dans le cadre familial, était adapté au milieu socioculturel dans lequel il était dispensé. Prenons pour exemple les marchands assyriens qui, depuis Aššur, sur le Tigre, pratiquaient le commerce à longue distance

avec l'Anatolie centrale. Ils avaient installé sur place des comptoirs de commerce dont le centre administratif se trouvait à Kaniš, non loin de l'actuelle Kayseri. Là, dans leurs maisons, les archéologues ont mis au jour 22 500 tablettes. Ces textes – des lettres reçues de leurs familles et collègues demeurés à Aššur, des contrats et des notices comptables – datent de la première moitié du XIX^e siècle avant notre ère. Cette documentation privée paléo-assyrienne constitue le premier témoignage écrit d'un système commercial complexe fondé sur des échanges interna-

tionaux. Quelques textes scolaires figurent au nombre des trouvailles : il s'agit de listes de mots, de morceaux de phrases, d'une liste progressive des poids, et surtout de petits exercices de calcul. Contrairement aux écoliers babyloniens du Sud mésopotamien qui avaient une formation plutôt académique, les apprentis marchands assyriens recevaient une formation professionnelle. Les listes lexicales comportent les signes sumériens des métaux et pierres qu'ils négociaient. La table métrologique propose une progression des poids correspondant non seulement à ceux que l'on trouve dans les textes, mais aussi aux poids en pierre exhumés lors des fouilles. Les exercices de calcul proposent des conversions : il s'agit de calculer le poids d'argent nécessaire à l'achat d'un poids d'or, d'étain ou de

cuivre. Les phrases apprises par cœur, proches de la langue parlée, sont celles qui figurent dans la correspondance des marchands et de leurs épouses. Le syllabaire employé par les Assyriens pour écrire leurs tablettes était réduit : pas plus de 150 à 200 signes, le plus souvent des syllabes simples et peu de logogrammes. La quantité de missives découvertes à Kaniš implique qu'une proportion non négligeable de la population assyrienne était en mesure d'écrire. Beaucoup de lettres semblent avoir été écrites sans l'intermédiaire d'un professionnel. En fonction du cursus scolaire suivi, il existait donc une grande variété de pratiques de la langue et de l'écriture.

Cécile Michel

CNRS, Archéologie et sciences de l'Antiquité (UMR 7041), Nanterre

S'agissant de la prononciation de , nous avons aussi un repère. Il apparaît comme substantif dans un autre texte akkadien plus ancien de plusieurs siècles. Il devrait toutefois y figurer sous la forme d'un accusatif (complément d'objet direct), que beaucoup de langues sémitiques marquent par la terminaison « a ». D'autres considérations nous ont en outre appris qu'en vieil akkadien, la marque de la déclinaison est augmentée par un « m ». On en déduit que le signe  a dû se prononcer « am ».

Un dernier indice est livré par une convention de l'écriture cunéiforme : les syllabes du type consonne-voyelle-consonne sont souvent représentées par deux signes syllabiques du type consonne-voyelle et voyelle-consonne, ce qui double donc la voyelle en écriture, mais pas dans la prononciation. Tout cela conduit à conclure que les deux signes  et  se lisaient « la-am », et donc que le signe  se prononçait « lam ». Par des raisonnements similaires, les chercheurs ont aujourd'hui rendu possibles la lecture et la prononciation des textes cunéiformes (voir le site Internet indiqué dans la bibliographie).

Le grand nombre d'homophones du sumérien et d'autres ambiguïtés rendent les prononciations anciennes ainsi reconstituées incertaines, ce dont les linguistes sont bien sûr très conscients. Les significations multiples du système d'écriture et ses règles orthographiques très souples par comparaison à d'autres langues ne permettent pas de tirer des conclusions définitives. Toutefois, dans l'Antiquité, ces ambiguïtés avaient des avantages, car elles permettaient de jouer avec les mots.

Pour gagner du temps et de la place, les fonctionnaires ont en effet commencé à employer des logogrammes – des signes représentant des mots – tandis que les auteurs littéraires ou scientifiques employaient au contraire un style compliqué, non seulement pour manifester leur culture, mais aussi afin de combiner plusieurs niveaux de lectures.

Une chose est sûre, le déchiffrement des textes cunéiformes occupera les assyriologues encore longtemps. Et afin de mieux appréhender ces textes, il faudrait pouvoir leur associer le contexte archéologique de leur découverte. Espérons que ce sera un jour possible. ■



6. CETTE TABLETTE, retrouvée dans les archives de la chancellerie d'Amar-na en Égypte, illustre la diplomatie du II^e millénaire avant notre ère. Le souverain de Mittani (au Nord-Est de la Syrie actuelle) y salue le pharaon Amenhotep III, l'appelant « frère » ; il se considérait donc comme son égal.

Des corrélations à la causalité

Isabelle Drouet

À partir de données statistiques, peut-on déterminer les liens de cause à effet entre des phénomènes et, si oui, comment ? Les philosophes des sciences ont renouvelé les réflexions sur cette question.

Établir un lien causal entre deux événements, phénomènes ou situations est une opération mentale qui est au fondement de notre compréhension du monde et de notre capacité à agir sur lui. Le plus souvent, cette opération est menée de façon intuitive et inconsciente. Par exemple, lorsque la main lâche un objet, ce dernier tombe ; en conséquence, le cerveau humain comprend très vite, dès le plus jeune âge, que le fait de lâcher un objet entraîne sa chute.

Mais les relations de cause à effet ne sont pas toujours aussi faciles à établir (voir la figure 1). Bien souvent, les scientifiques ont accès à des liens statistiques entre les phénomènes qu'ils étudient, relations que l'on nomme corrélations et qui les renseignent sur les probabilités (ou les fréquences d'occurrence) des phénomènes en question. Le défi consiste alors à identifier correctement les relations de causalité, c'est-à-dire à déterminer, dans l'ensemble des phénomènes considérés, lesquels sont les causes et lesquels sont les effets. Quelle est la vision actuelle sur cette question ? Pour l'expliquer, nous allons prendre un

L'ESSENTIEL

■ Déterminer les relations de cause à effet entre les phénomènes est une tâche quotidienne des scientifiques.

Elle s'appuie souvent sur la mise au jour de liens statistiques, ou corrélations.

■ La déduction de liens de causalité à partir de corrélations fait l'objet de théories fondées sur l'idée qu'un effet est davantage probable en présence d'une de ses causes qu'en son absence.

■ Des algorithmes inspirés de ces théories sont utilisés dans les sciences empiriques.

© Bruno Vacaro, d'après F. H. Messeri, *The New England Journal of Medicine*, vol. 367(16), pp. 1562-1564, 2012



exemple simple qui nous suivra tout au long de cet article.

Baptiste Coulmont, sociologue à l'Université Paris 8, tient un blog où, en particulier, il présente des statistiques sur les résultats aux épreuves du baccalauréat et les prénoms des candidats. On peut notamment y apprendre qu'en 2012, parmi les candidates au baccalauréat général ou technologique ayant obtenu une note d'au moins 8 sur 20 et ayant autorisé la publication de leur résultat sur Internet, plus d'un quart de celles prénommées Irène ont obtenu la mention « Très bien » – alors que, par exemple, ce fut le cas de moins de un pour cent des Alison. Ici, le prénom Irène et l'obtention de la mention « Très bien »

sont « corrélés positivement », expression qui traduit le fait qu'il est plus probable d'obtenir cette mention en se prénommant Irène qu'en portant un autre prénom.

Faut-il en conclure que le prénom Irène est doté de propriétés spéciales, en vertu desquelles celles qui le portent obtiennent plus facilement la mention « Très bien » au baccalauréat ? Cette corrélation n'est-elle pas plutôt une conséquence de ce que les parents qui choisissent de prénommer leur fille Irène ont un capital culturel supérieur à la moyenne, donc une probabilité supérieure de voir leur enfant obtenir la mention « Très bien » au baccalauréat ? Ou y a-t-il un peu des deux, ou d'autres facteurs encore, dans la réussite des Irène ?

1. LA CONSOMMATION MOYENNE

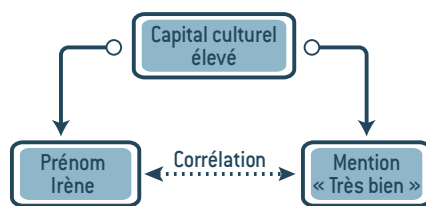
de chocolat par habitant est corrélée au nombre de lauréats du prix Nobel, d'après une étude de l'Américain Franz Messerli publiée en 2012 : en général, plus un pays présente une consommation élevée, plus nombreux sont ses ressortissants nobélisés. Mais on ne peut pas conclure qu'une consommation accrue de chocolat a pour effet d'augmenter le nombre de lauréats du prix Nobel. Il est même vraisemblable que la corrélation soit trompeuse : la richesse du pays pourrait être le facteur commun aux deux propriétés considérées, sans que ces propriétés soient causalement liées entre elles.



Ces questions reviennent à se demander quelle histoire causale se cache derrière la corrélation observée entre la mention et le prénom, c'est-à-dire quels sont les liens de cause à effet sous-jacents à la situation. Plus généralement, la question est : à quelles conditions des corrélations permettent-elles de tirer des conclusions causales, par exemple de conclure que le prénom Irène est la cause de la mention « Très bien » ?

Ce problème se pose quotidiennement dans tous les domaines de la science où l'on est confronté à des ensembles de données empiriques nécessitant une explication : économie, épidémiologie, toxicologie, astronomie, etc. L'interprétation correcte des corrélations observées en termes d'éventuels liens de causalité sous-jacents constitue l'un des pivots de la démarche scientifique. Elle est à ce titre d'une grande importance théorique.

Elle a aussi une grande importance pratique. C'est notamment le cas dans le domaine de la santé publique. Ainsi, quand on constate une forte corrélation entre l'exposition à une certaine substance de synthèse et une pathologie grave, il faut être sûr que cette corrélation résulte d'un lien de causalité avant que les pouvoirs publics décident d'une mesure telle que l'interdiction de la commercialisation de



2. CHEZ LES CANDIDATES au baccalauréat, le prénom Irène est corrélé à la mention « Très bien ». Mais l'existence d'un lien de cause à effet entre le prénom et la mention au baccalauréat est peu vraisemblable. La corrélation observée serait plutôt une conséquence de ce que les parents qui choisissent de prénommer leur fille Irène ont un capital culturel supérieur à la moyenne, d'où une probabilité supérieure pour leur enfant d'obtenir une bonne mention au baccalauréat.

la substance en question. Par exemple, la corrélation pourrait être due au fait que les personnes exposées à cette substance sont aussi systématiquement exposées à un autre produit, la pathologie étant causée par ce dernier et non par la substance suspectée initialement.

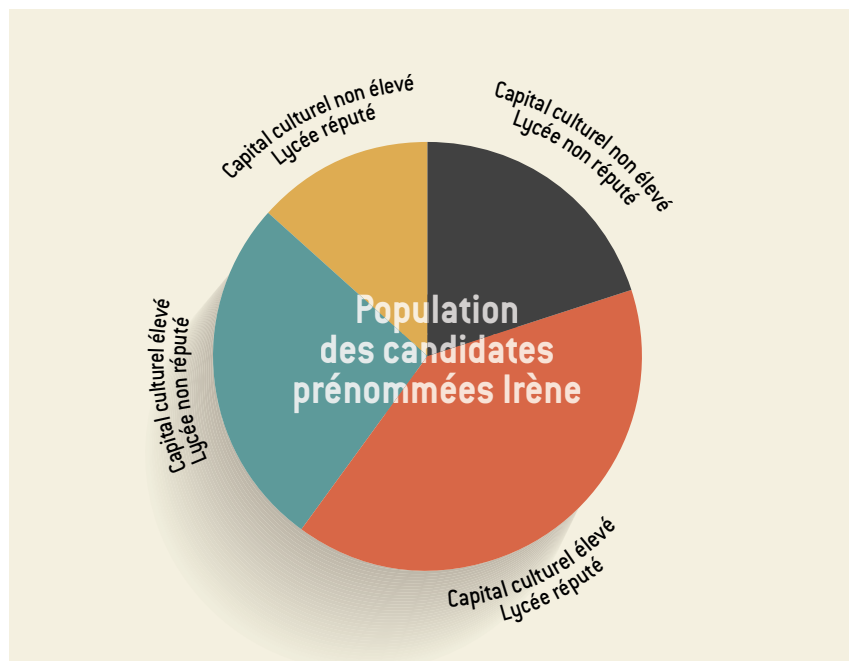
Pour passer des corrélations observées aux relations causales, deux étapes sont à franchir. La première consiste à passer des corrélations observées sur un échantillon d'une population à celles en vigueur dans la population entière. Cette première étape, la généralisation d'un échantillon de population à la population entière, relève de la science statistique. La seconde étape consiste, pour la population considérée, à passer des corrélations aux liens de cause à effet. Seule cette seconde étape concerne spécifiquement la causalité, et c'est sur elle que portera notre propos.

Diverses approches

La question de la causalité est réapparue en philosophie des sciences dans la seconde moitié du XX^e siècle. L'une des lignes d'analyse explorées visait à définir la causalité par le concept de corrélation – ou de dépendance probabiliste, selon les termes en usage chez les philosophes.

Cette façon de définir la causalité n'est pas la seule. L'une des principales définitions concurrentes repose sur l'idée que les effets n'auraient pas lieu si leurs causes n'avaient pas lieu ; cette approche peut s'appliquer à certaines études historiques par exemple. Une autre proposition, formulée dans le cadre des théorisations de la démarche expérimentale, se fonde sur la possibilité de manipuler les effets en intervenant sur les causes. Une troisième approche, enfin, est axée sur la caractérisation physique des relations causales, c'est-à-dire sur l'identification des grandeurs physiques dont la transmission de proche en proche constitue la relation de causalité.

Toutefois, l'analyse de la causalité en termes de corrélations est sans doute celle à laquelle les scientifiques font le plus appel, au moins explicitement, et c'est celle qui nous concerne ici. Cette approche repose sur l'idée qu'un effet est plus probable en présence de l'une de ses causes qu'en son absence. Ainsi, il est plus probable pour un candidat d'obtenir la mention « Très bien » s'il a un capital culturel élevé que sinon. En utilisant la notion de probabilité



3. LE PRÉNOM IRÈNE serait la cause de la mention « Très bien » si et seulement si ce prénom rendait cette mention plus probable dans chacune des sous-populations définies par les autres causes possibles de la mention. Dans l'exemple ici représenté, quatre sous-populations sont définies par le lycée fréquenté (réputé ou non) et par le capital culturel (élevé ou non).

conditionnelle (voir l'encadré ci-contre), le fait qu'un effet E soit plus probable en présence de l'une de ses causes C qu'en son absence s'écrit :

$$p(E | C) > p(E | \text{non-C}).$$

Cette inégalité, que nous noterons (A), se lit : la probabilité de E sachant que C est réalisé est supérieure à la probabilité de E sachant que C n'est pas réalisé. On peut montrer qu'elle est équivalente à l'inégalité $p(E | C) > p(E)$ (la probabilité de E sachant que C est réalisé est supérieure à la probabilité de E en général).

Cependant, l'inégalité (A) ne suffit pas à caractériser les relations de cause à effet. Pour le comprendre, revenons à notre exemple initial, où il est plus probable d'obtenir une mention « Très bien » en se prénommant Irène qu'autrement. Une première difficulté est que la corrélation positive est symétrique et ne rend donc pas compte de la direction du lien de cause à effet : les lois du calcul des probabilités montrent que si C (prénom Irène) augmente la probabilité de E (mention « Très bien »), alors E augmente la probabilité de l'événement C (voir l'encadré ci-contre). En d'autres termes, la corrélation exprimée par (A) ne permet pas de savoir si C est la cause de E ou si, au contraire, c'est E qui entraîne C.

Des corrélations sans liens de causalité

Une seconde difficulté, déjà indiquée, est que la corrélation positive du prénom Irène avec la mention « Très bien » pourrait ne pas indiquer un rapport de causalité entre prénom et mention, mais cacher une structure causale plus complexe, impliquant par exemple le capital culturel de la personne nommée Irène. Selon cette hypothèse, un capital culturel élevé favoriserait à la fois le choix du prénom Irène et l'obtention d'une mention « Très bien », d'où la corrélation positive entre ces deux événements (voir la figure 2).

C'est là un fait général : quand une cause C a deux effets E_1 et E_2 , l'occurrence de E_1 (ou de E_2) augmente la probabilité de E_2 (ou de E_1), même si E_1 ne cause pas E_2 (ou inversement). En d'autres termes, pas plus qu'elle ne rend compte de la direction de la causalité, l'inégalité (A) ne permet de distinguer entre un lien de causalité (C est la cause de E) et un lien entre deux effets d'une même cause (C et E sont tous deux causés par un certain facteur F).

Probabilité conditionnelle et symétrie cause-effet

En l'absence d'informations particulières, notons $p(A)$ la probabilité d'un événement A. La probabilité de A verra sa valeur modifiée si l'on sait qu'un événement B, qui peut être lié à A, s'est produit.

La probabilité de A sachant que B s'est produit, notée $p(A | B)$, est alors égale à $p(A \text{ et } B)/p(B)$, où $p(A \text{ et } B)$ désigne la probabilité qu'à la fois A et B soient réalisés. Dans l'exemple d'un lancer de dé, si A est l'événement « Le dé affiche le nombre 3 ou 6 » et B l'événement

« Le dé affiche un nombre pair », l'événement (A et B) est « Le dé affiche le nombre 6 » et la probabilité que le dé affiche 3 ou 6 sachant qu'un nombre pair a été obtenu est égale à $p(A | B) = (1/6)/(1/2) = 1/3$.

À partir de la définition ci-dessus, quelques mani-

pulations algébriques simples montrent que l'inégalité $p(E | C) > p(E)$, qui traduit le fait que la réalisation d'une cause C augmente la probabilité de l'effet E, est équivalente à l'inégalité $p(C | E) > p(C)$, c'est-à-dire que la réalisation de E augmente la probabilité de C. Les rôles de C et E sont ainsi échangés, et il en résulte que l'inégalité $p(E | C) > p(E)$ ne permet pas de distinguer le sens de la relation de causalité entre E et C.

Comment, alors, s'appuyer sur l'inégalité (A) pour développer une théorie adéquate de la causalité ? Une première stratégie a été poursuivie par l'Américain Patrick Suppes et exposée dans un ouvrage paru en 1970. L'idée consiste à caractériser, par des propriétés probabilistes, les situations donnant lieu à des corrélations positives auxquelles ne correspond pas une relation de cause à effet. On dira alors que C cause E si et seulement si C et E vérifient l'inégalité (A), mais pas les propriétés probabilistes en question. Cette stratégie a pu être développée grâce au travail du philosophe d'origine allemande Hans Reichenbach, qui avait donné en 1956 une caractérisation probabiliste des structures causales comprenant une cause et deux effets, dont aucun n'entraîne l'autre (voir l'encadré page 58).

Cependant, la première difficulté indiquée ci-dessus, à savoir le caractère symétrique de la corrélation positive, est beaucoup plus difficile à résoudre : il n'est pas aisé de déterminer la direction de la causalité au moyen de concepts probabilistes. Aussi P. Suppes proposa-t-il de la faire découler de la direction du temps. D'après ce philosophe, C est une cause de E si les trois conditions suivantes sont réunies : C et E vérifient l'inégalité (A) ; C et E ne vérifient pas les relations probabilistes entre effets d'une cause commune dont aucun ne cause l'autre ; C est antérieur à E.

La proposition de P. Suppes présente plusieurs défauts. Au plan conceptuel, faire découler la direction de la causalité

■ L'AUTEUR



Isabelle DROUET est maître de conférences à l'Université Paris-Sorbonne, où elle enseigne la philosophie des sciences et la logique.

de celle du temps interdit une construction inverse, consistant à fonder la direction du temps sur celle de la causalité – idée que certains philosophes trouvent séduisante. Et au plan méthodologique, la proposition de P. Suppes n'est guère éclairante : autant les informations probabilistes sont souvent plus faciles à obtenir que les informations causales, autant ce n'est pas toujours le cas des informations temporelles. Par exemple, il semble clair que le prénom est antérieur à la mention au baccalauréat ; mais quand on cherche à relier un taux de chômage élevé avec une croissance économique faible, laquelle des deux propriétés est antérieure à l'autre ?

Dans une seconde famille de théories probabilistes de la causalité, on cherche plutôt à préciser l'idée selon laquelle les causes rendent leurs effets plus probables. Être une cause de E, c'est rendre E plus probable dans les différentes sous-populations définies par les autres variables pertinentes. Autrement dit, le prénom Irène est la cause de l'obtention d'une mention « Très bien » si et seulement si « Irène » rend cette mention plus probable une fois que toutes les autres informations pertinentes ont été prises en compte. Supposons pour simplifier que le capital culturel des parents soit la seule information de ce type (ce n'est en réalité pas le cas) ; cela signifie que « Irène » serait la cause de la mention « Très bien » si et seulement si ce prénom rendait plus probable cette mention à la fois dans la sous-population des candidates

culturellement favorisées et dans celle des autres candidates.

Est-il possible de caractériser de façon générale de telles sous-populations ? Le capital culturel a un effet causal sur la mention au baccalauréat, et le prendre en compte suffit ici à garantir l'analyse en termes de corrélation positive parce que nous avons supposé que, le prénom mis à part, il constitue la seule information pertinente. Autrement dit, nous avons supposé que, le prénom mis à part, le capital culturel est la seule autre cause possible de la mention. Et nous avons distingué seulement deux sous-populations homogènes vis-à-vis du

L'IDÉE INTRODUITE EN 1979

par Nancy Cartwright a conduit à une analyse de la causalité que les philosophes considèrent comme satisfaisante.

capital culturel, celle des candidates culturellement favorisées et celle des candidates qui ne le sont pas. L'analyse pourrait être améliorée en décomposant plus finement la population en fonction du capital culturel : « Irène » causerait la mention « Très bien » si et seulement si ce prénom rendait la mention « Très bien » plus probable dans toutes les sous-populations définies par les différentes valeurs du capital culturel.

Admettons maintenant qu'il existe une deuxième cause possible de ce type, par exemple la fréquentation d'un lycée réputé. Il faut alors distinguer au moins quatre sous-populations, caractérisées par

les propriétés suivantes : capital culturel élevé et lycée réputé ; capital culturel élevé et lycée non réputé ; capital culturel non élevé et lycée réputé ; capital culturel non élevé et lycée non réputé. « Irène » serait la cause de la mention « Très bien » si et seulement si ce prénom rendait la mention « Très bien » plus probable dans chacune de ces quatre sous-populations (voir la figure 3).

De façon générale, selon cette ligne d'analyse, C cause E si et seulement si C rend E plus probable dans toutes les sous-populations que permettent de définir les causes possibles de E autres que C (et, pour être précis, non causées par C). Cette idée a été introduite en 1979 par la philosophe britannique et américaine Nancy Cartwright. Puisque les sous-populations définies par les causes de E autres que C ne sont pas identiques aux sous-populations définies par les causes de C autres

que E, cette analyse n'est pas symétrique. Cette démarche a été précisée dans les années 1980, en particulier par N. Cartwright elle-même. Elle a abouti à une analyse de la causalité que les philosophes considèrent comme satisfaisante.

Toutefois, même si elle constitue un progrès conceptuel, cette analyse de la causalité a ses limites. En effet, il est impossible de transposer directement les théories probabilistes de la causalité au domaine de la méthodologie scientifique : les scientifiques ne peuvent pas les utiliser comme seul guide pour identifier des relations causales à partir des corrélations qu'ils observent dans la nature ou dans leurs expériences. Pourquoi ?

D'abord, ces théories sont circulaires et, en conséquence, il est impossible de même commencer à mener la tâche visant à déterminer si C cause E. En effet, pour déterminer si C cause E, il faudrait selon ces théories déterminer si C augmente la probabilité de E dans toutes les sous-populations définies par les causes de E autres que C. Pour déterminer si C cause E, il faut donc connaître toutes les autres causes de E : en d'autres termes, il faut connaître les causes de E pour déterminer quelles sont les causes de E ! Ainsi, les théories probabilistes de la causalité ne permettent pas à elles seules de commencer à acquérir des connaissances causales.

Ensuite, les théories probabilistes ne définissent pas de principe de clôture *a priori* qui viendrait délimiter l'ensemble des

Corrélations sans lien de causalité

En 1956, le philosophe d'origine allemande Hans Reichenbach a caractérisé en termes probabilistes des situations où une cause C a deux effets E et E', ces deux effets n'étant pas liés par causalité (E n'entraîne pas E', et E' n'entraîne pas E).

Cette caractérisation est la suivante :

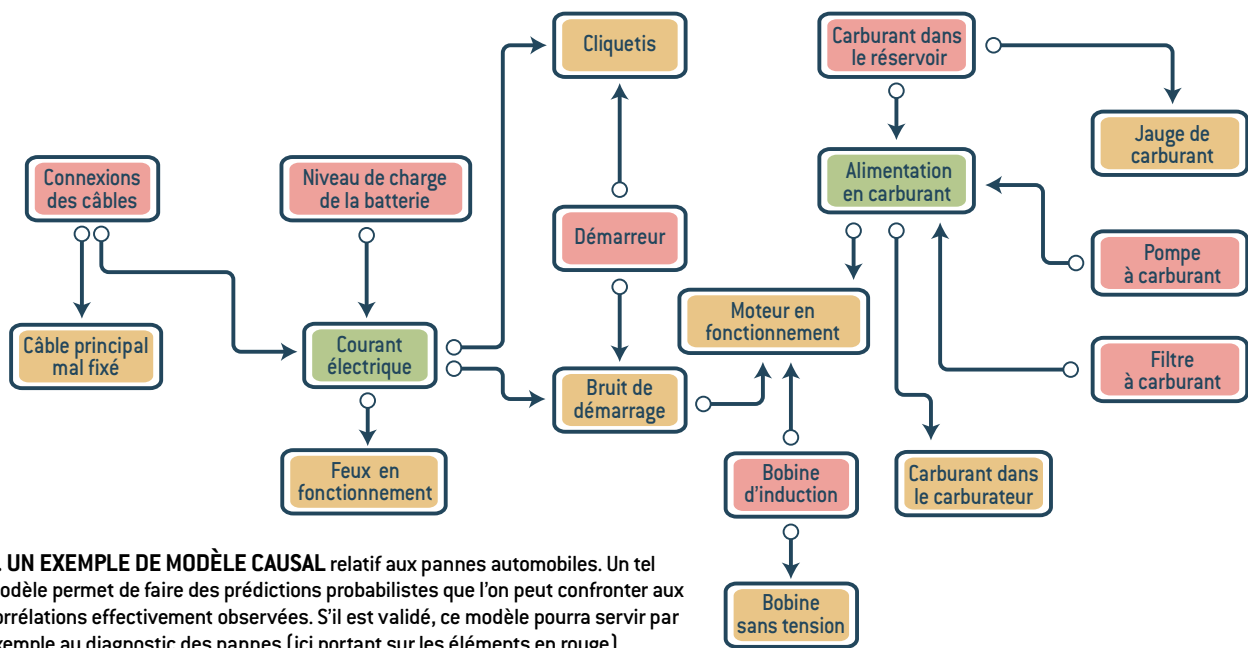
1. $p(E | E') > p(E | \text{non-}E')$
2. $p(E | C) > p(E | \text{non-}C)$
3. $p(E' | C) > p(E' | \text{non-}C)$
4. $p(E | E' \text{ et } C) = p(E | C)$
5. $p(E | E' \text{ et non-}C) = p(E | \text{non-}C)$.

Selon la clause (1), E et E' sont positivement corrélés.

Les clauses (2) et (3) indiquent qu'il en va de même de E et C d'une part, et E' et C d'autre part. Jusque-là, il n'y a pas de différence entre E, E' et C.

Mais les clauses (4) et (5) isolent une propriété spécifique à C, qui traduit en termes probabilistes son

statut causal particulier dans le système liant les trois propriétés C, E et E'. Selon (4), E et E' ne sont pas corrélés dans la sous-population des individus qui ont la propriété C ; selon (5), ils ne le sont pas non plus dans la sous-population des individus qui n'ont pas la propriété C. Autrement dit, une fois qu'on sait si C est le cas ou non, E' ne nous apprend plus rien à propos de E. Pour décrire cette situation, on dit souvent que C fait écran entre E et E'.



4. UN EXEMPLE DE MODÈLE CAUSAL relatif aux pannes automobiles. Un tel modèle permet de faire des prédictions probabilistes que l'on peut confronter aux corrélations effectivement observées. S'il est validé, ce modèle pourra servir par exemple au diagnostic des pannes (ici portant sur les éléments en rouge).

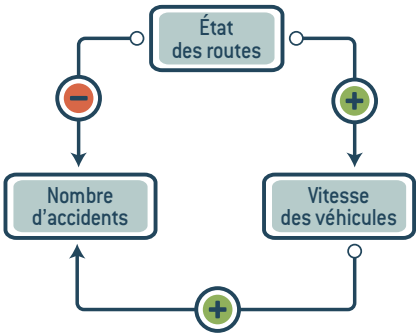
causes possibles d'un effet donné. Elles ne permettent donc jamais de savoir si l'on a identifié toutes les causes d'un effet E, ni par conséquent de savoir si l'on a identifié toutes les causes de E autres que C, ni donc d'établir que C cause E.

En dépit de ces deux obstacles, il existe aujourd'hui au moins trois types de méthodes pour tirer des conclusions causales à partir de corrélations. Comment est-ce possible ?

Une des méthodes : les essais randomisés

Le premier type de méthodes repose sur l'analyse suivante : ce que la circularité et l'absence de principe de clôture interdisent précisément, c'est de tirer des conclusions causales à partir des probabilités dans des contextes où toutes les causes sont présentes en même temps, où personne n'agit sur elles et où le facteur C, dont on cherche à déterminer s'il est une cause de E, a le même statut que les autres causes de E. Or l'expérimentation permet d'éviter cela : la première stratégie consiste ainsi à intervenir sur le système étudié et à s'intéresser non pas à la probabilité de l'effet E quand sa cause supposée C est observée, mais à sa probabilité quand l'expérimentateur impose C.

C'est exactement ce qui se passe dans un essai clinique randomisé, où l'on admi-



5. UNE RELATION DE CAUSALITÉ ne se traduit pas forcément par une corrélation. Ainsi, il existe un lien causal entre l'état des routes et le nombre d'accidents, mais il est possible que la corrélation n'apparaisse pas. Toutes choses égales par ailleurs, un meilleur état des routes réduit le nombre d'accidents ; mais les conducteurs tendent à rouler plus vite si la route est meilleure, ce qui accroît la probabilité d'accidents. Les deux effets peuvent se compenser, auquel cas il n'y aurait pas de corrélation.

nistre à chaque participant soit le traitement étudié, soit un placebo, selon le résultat d'un tirage au sort. Les probabilités de guérison après une telle intervention permettent de déterminer si le traitement cause la guérison.

Plus précisément, admettons que le tirage au sort garantisse que les différentes sous-populations à considérer soient représentées de façon égale dans les deux groupes ; une probabilité supérieure de guérison dans le groupe ayant reçu le traitement implique que la probabilité de guérison est supérieure dans au moins une de ces situations, et donc que le traitement cause la guérison au sens des théories probabilistes (voir l'encadré page 60). Ce résultat vaut même si l'on n'a pas identifié les causes de guérison autres que le traitement. Il n'est donc pas nécessaire d'identifier toutes les causes de E différentes de C en vue de déterminer si C cause E. Les deux obstacles que nous avons mis au jour, circularité et absence de principe de clôture, sont ainsi contournés.

Une deuxième stratégie émane d'une analyse un peu différente : les obstacles cités plus haut interdisent de tirer des conclusions causales à partir des seules corrélations, et en l'absence de connaissances causales préalables. En ce sens, ils interdisent d'induire des conclusions causales. Mais l'induction n'est pas le seul mode de raisonnement disponible : les méthodes du second type

ont un caractère hypothético-déductif. Qu'est-ce que cela signifie ?

Pour déterminer si le prénom Irène cause la mention « Très bien », un raisonnement hypothético-déductif débute par la formulation d'une hypothèse sur les causes de la mention (lesquelles pourraient inclure le capital culturel des parents, la réputation de l'établissement fréquenté, l'âge du candidat, etc.) et sur les relations causales qu'elles entretiennent avec le prénom. Généralement, on nomme « modèle causal » une telle hypothèse, que l'on représente par un graphe : les nœuds de ce graphe correspondent aux phénomènes

pris en compte (le prénom, la mention, les causes de la mention...) et les flèches d'un nœud à l'autre représentent des relations de cause à effet (voir la figure 4).

En utilisant les théories probabilistes de la causalité, on tire des conclusions probabilistes d'un tel modèle. Si ces conclusions contredisent les observations, le modèle est rejeté ; si elles sont valides, il peut être considéré comme confirmé. Ici, le problème de la circularité et celui de l'absence de principe de clôture sont résolus dès lors que l'on définit un modèle causal. D'une part, en effet, tout modèle causal porte sur un certain nombre de phénomènes bien

déterminés et, de ce fait, il véhicule une réponse à la question de la clôture laissée ouverte par les théories probabilistes. D'autre part, pour chacun des phénomènes qu'il représente, le modèle formule une hypothèse relativement à l'ensemble de ses causes. La circularité des théories probabilistes n'intervient donc plus.

Reste que l'expérimentation et l'hypothético-dédution ont chacune des limites. Un essai randomisé n'est que rarement envisageable – par exemple, il ne l'est pas dans le cas du prénom et de la mention. De même, le succès des approches hypothético-déductives dépend largement des hypothèses qui auront pu être formulées.

Toutefois, des algorithmes développés depuis les années 1990 par les équipes de Judea Pearl, à l'Université de Californie à Los Angeles, et de Clark Glymour, Peter Spirtes et Richard Scheines, à l'Université Carnegie Mellon de Pittsburgh, visent à contourner les obstacles que nous avons mis en évidence d'une façon qui soit à la fois observationnelle et inductive.

Des algorithmes utiles

Ces algorithmes prennent pour entrée les corrélations entre phénomènes d'un ensemble préalablement fixé. Le problème constitué par l'absence de principe de clôture est donc résolu exactement de la même façon que dans le cadre hypothético-déductif : en isolant d'emblée un ensemble fini de phénomènes. Mais ici, aucune hypothèse causale n'est formulée. À partir des seules corrélations – les informations en termes de probabilités –, on construit tous les graphes susceptibles d'être le modèle causal correct pour l'ensemble de phénomènes considéré. L'obstacle de la circularité des théories probabilistes de la causalité est donc contourné.

Ces algorithmes font appel à une analyse un peu différente (et un peu moins satisfaisante) de celle qu'utilisent les théories probabilistes circulaires, avec la conséquence importante que des informations purement probabilistes suffisent à déterminer si deux phénomènes de l'ensemble considéré ont un lien de causalité direct, sans l'intermédiaire d'un autre phénomène.

Cependant, l'analyse qui fonde ces algorithmes admet des contre-exemples, qui ont fait l'objet d'un vif débat dans les années 2000. Notamment, elle suppose

LES ESSAIS CLINIQUES RANDOMISÉS

Le premier essai clinique randomisé ayant donné lieu à une publication scientifique a été mené en Grande-Bretagne dans les années 1940*. L'étude portait sur l'effet d'un antibiotique, la streptomycine, sur la tuberculose pulmonaire.

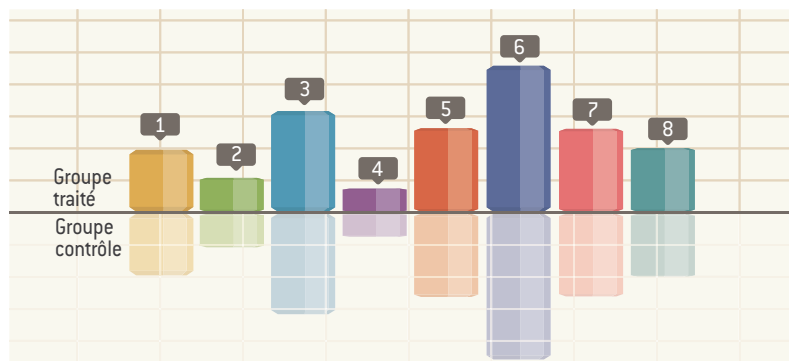
Cent neuf patients, âgés de 15 à 25 ans, y ont participé. Ils ont été répartis en deux groupes, l'un recevant le traitement, l'autre non (le « groupe contrôle »). La répartition a été effectuée selon une procédure aléatoire garantissant que deux patients du même sexe et relevant du même hôpital aient la même probabilité d'appartenir au groupe recevant la streptomycine.

Cette façon de procéder vise à répartir de manière similaire dans les deux groupes les autres facteurs que la streptomycine, le sexe et l'hôpital de prise en charge susceptibles d'affecter causalement l'évolution de l'état de santé des patients.

Imaginons que, dans le cas considéré, il existe trois facteurs de ce type : l'âge, le régime alimentaire et le niveau culturel. Si chacun de

ces facteurs est susceptible de deux modalités, huit situations peuvent se présenter. La randomisation (le choix aléatoire des patients à traiter parmi les participants à l'essai clinique) vise à faire en sorte que ces huit situations soient représentées de manière comparable dans le groupe traité et dans le groupe contrôle (voir la figure). Cette procédure est désormais la règle dans les essais cliniques rigoureux, qui doivent par ailleurs porter sur un nombre suffisant de patients pour que la randomisation soit efficace.

*G. Marshall et al., *British Medical Journal*, vol. 2(4582), pp. 769-782, 1948.



EN SUPPOSANT QUE L'ÂGE, le régime alimentaire et le niveau culturel puissent influencer sur l'évolution de l'état de santé, et que chacun de ces facteurs ait deux valeurs pertinentes seulement, l'ensemble des patients constitue huit sous-populations. Grâce à la randomisation, les individus de chaque sous-population sont à peu près également répartis entre le groupe traité et le groupe contrôle.

que la relation de cause à effet n'est jamais symétrique, là où nous aurions envie de dire que, par exemple, un système immunitaire déprimé est à la fois cause de la maladie et causé par celle-ci.

Un autre défaut est qu'elle suppose aussi que les relations causales directes se traduisent toujours dans les probabilités, ce qui n'est pas le cas. Par exemple, un meilleur état des routes à la fois cause directement une diminution des accidents et indirectement leur augmentation, en entraînant une augmentation de la vitesse, et il est possible que ces deux effets se compensent exactement (voir la figure 5). Dans ce cas, l'état des routes n'est pas corrélé au nombre d'accidents, alors qu'il existe des relations de causalité. Or les algorithmes en question concluraient à l'absence d'effet causal direct de l'état des routes sur le nombre d'accidents.

La conception de la causalité véhiculée par ces algorithmes n'est donc pas complètement satisfaisante. En outre, le diagramme produit par ces algorithmes est souvent ambigu : il représente plusieurs graphes

causaux entre lesquels les algorithmes ne tranchent pas. Mais les contre-exemples restent exceptionnels, en particulier si l'ensemble de phénomènes considérés est soigneusement défini, et l'ambiguïté ne nuit pas à la correction. Ces algorithmes peuvent donc être utilisés en sciences et ils le sont, principalement à titre exploratoire et dans des contextes où beaucoup de données, mais peu de théories, sont disponibles. Cela a par exemple été le cas dans une étude publiée en 2004 sur les causes de la mortalité infantile aux États-Unis.

En somme, les réflexions philosophiques n'ont pas seulement permis de caractériser la causalité en termes de corrélations. Elles nous permettent aussi de comprendre pourquoi il est difficile d'identifier les relations de cause à effet sur la base de prémisses probabilistes et de faire apparaître les différentes méthodes qui existent pourtant comme mettant en œuvre des stratégies de contournement différentes. Les arbitrages qui sous-tendent le choix de l'une de ces méthodes en pratique sont ainsi clarifiés. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

I. Drouet, **Causes, probabilités, inférences**, Vuibert, 2012.

C. Hitchcock, **Probabilistic causation**, dans *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2012 Edition), E. N. Zalta (ed.), disponible sur : <http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/causation-probabilistic/>

N. Cartwright, **Are RCTs the gold standard ?**, *BioSocieties*, vol. 2, pp. 11-20, 2007.

cité
des sciences & de l'industrie

forum de la Villette

à la Cité des sciences et de l'industrie

samedi 14 juin de 9h à 18h

Vieillesse : naissance d'une nouvelle société

➤ Auditorium

Entrée libre dans la limite des places disponibles.
Réservation conseillée : conferences@universcience.fr

C'est un phénomène inédit dans l'histoire de l'humanité : tandis que la proportion des plus de 60 ans augmente, celle des moins de 15 ans diminue. Comment s'adapter à cette révolution démographique ?

Forum parrainé par Jean-Claude Ameisen, médecin et chercheur, professeur d'immunologie à l'université Paris-Diderot, et animé par Marie-Odile Monchicourt, journaliste scientifique.

En partenariat avec

Avec le soutien de

program complet sur cite-sciences.fr

**Le réchauffement global
s'est temporairement ralenti,
mais une crise climatique menace
toujours dans un avenir proche.**

Michael Mann



CLIMAT

le faux espoir

« Les températures sont constantes depuis 15 ans – et personne ne peut l'expliquer. »

Wall Street Journal

« La "pause" du réchauffement climatique pourrait durer encore 20 ans et la glace de la mer Arctique a déjà commencé à se reformer. »

Daily Mail

Les médias populaires abondent de telles déclarations rassurantes sur le climat, mais ils se fourvoient. Le réchauffement climatique se poursuit et demeure un problème urgent.

D'où vient ce malentendu ? La température moyenne à la surface de la Terre a augmenté moins vite durant la dernière décennie qu'au cours de la décennie précédente. On parle communément d'une « pause », mais ce terme est trompeur, car la température a continué de croître ; il s'agit plutôt d'un ralentissement. Que

présage ce ralentissement sur le réchauffement futur ?

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est chargé de répondre aux questions de ce type. Ses prévisions sont publiées tous les cinq ou sept ans. Dans son rapport de 2013 – le cinquième rapport majeur –, il a légèrement abaissé la valeur minimale du réchauffement par rapport à la version de 2007, afin de prendre en compte le ralentissement de la dernière décennie. Les travaux du GIEC font référence et orientent les politiques climatiques dans le monde, de sorte que ce petit changement a suscité le débat sur la rapidité du réchauffement et sur le temps dont nous disposons pour l'arrêter.

J'ai mené plusieurs calculs pour apporter quelques éléments de réponse. Selon ces calculs, si nous continuons à brûler

des carburants fossiles au rythme actuel, la température franchira une limite correspondant à une catastrophe environnementale en 2036. La prétendue pause peut repousser cette échéance de quelques années, mais pas plus.

Un réchauffement inédit depuis plus de 1 000 ans

En 2001, le GIEC a publié une courbe que j'ai élaborée avec d'autres chercheurs, et qui a acquis une notoriété mondiale sous le nom de « crosse de hockey ». Elle représente l'évolution de la température dans l'hémisphère Nord au cours des 1 000 dernières années – aussi loin que nos données remontaient à l'époque. Cette courbe montre que pendant cette période, la température a peu changé jusqu'au milieu du XIX^e siècle (partie correspondant au manche de la crosse) et a