

ASPECTS ÉPISTÉMOLOGIQUES DES NOTIONS DE CORRÉLATION ET DE CAUSALITÉ*

F. BONSAK

Dans les quelques lignes qui précisent le sujet de cette séance, M. Delattre pose les questions suivantes :

«La mise en évidence de corrélations est-elle un aboutissement suffisant, ou seulement une étape dans la recherche de relations causales ? Existe-t-il des méthodes permettant de reconnaître, parmi les corrélations, celles qui relèvent effectivement d'une corrélation causale ?»

C'est à cette famille de problèmes que je voudrais consacrer l'essentiel de mon exposé, divisé en deux parties.

Dans la première, je préciserai un peu la notion de causalité, pour faciliter la discussion et éviter les malentendus.

Dans la seconde, j'essayerai de traiter le problème qui a été posé par M. Delattre, celui de l'induction causale, c'est-à-dire de la reconnaissance des relations causales.

La causalité est-elle encore une catégorie utile en science, ou n'est-elle plus, comme le prétend Bertrand Russell, qu'une relique d'un temps révolu ? Le savant doit-il encore raisonner en termes de causalité ou celle-ci relève-t-elle de la métaphysique, de la spéculation gratuite ?

Quelle est la cause de la gravitation, se demandaient les cartésiens ? Newton s'était peut-être lui aussi posé cette question, mais, n'ayant pas trouvé de réponse satisfaisante, il la laisse ouverte et préfère ne pas inventer d'hypothèses («*Hypotheses non fingo*»).

Le chemin tracé par Newton n'est-il pas celui qu'une saine science doit suivre ? Ne faut-il pas renoncer à chercher des causes explicatives ? Ne suffit-il pas de *décrire* ce qui se passe ?

Ces objections sont certainement pertinentes, mais il faut bien se rendre compte qu'elles ne touchent qu'un des sens du mot 'cause'. Dans le cadre de la gravitation, on peut utiliser celui-ci dans un autre sens et déclarer par exemple que la présence de la lune est cause des marées ou que celle du soleil est cause de la courbure de l'orbite terrestre.

Autrement dit : c'est peut-être une question vaine de chercher la cause de

* Actes du colloque *Élaboration et justification des modèles — Applications en Biologie*, présentés par P. DELATTRE et M. THELLIER, Maloigne, Paris (1979), t. 2, p. 441-450.

l'attraction universelle. Mais ce n'en est pas une de se demander quelle est la cause de l'attraction particulière que subit telle masse particulière. Il ne s'agit plus d'expliquer le pourquoi de la gravitation, mais le comment, ses modalités, la direction et la grandeur des forces qui interviennent.

Plus précisément : les lois d'évolution dans la nature ont en général une forme différentielle : elles ne permettent de prédire un état final que lorsqu'on donne un état initial. Il n'est pas nécessaire de chercher des causes de la loi elle-même; certes, il arrive qu'elle puisse être déduite dans le cadre d'une théorie, mais c'est là un problème tout différent de celui de sa cause.

Les causes utiles, fécondes sont au contraire dans la situation initiale. C'est parce que le soleil est là, dans telle direction, à telle distance et contient telle masse, que la force exercée sur ce corps-ci, de telle masse, a telle grandeur, telle direction et a pour conséquence, si elle n'est compensée par aucune autre, un mouvement accéléré de ce corps. Il ne s'agit pas d'expliquer les lois, mais d'expliquer avec leur aide quelles particularités de l'état dont on est parti ont déterminé telles particularités de l'état auquel on arrive ou quels événements passés ont eu pour conséquence tels événements actuels.

Si l'on prend le mot 'cause' dans ce sens, il perd toute connotation métaphysique et redescend au niveau de la science positive.

Mais, dans ce cadre, une remarque s'impose.

C'est une conception très répandue que chaque événement a *une* cause — et non plusieurs. De telle sorte que les événements se relient les uns aux autres pour former des chaînes, parallèles, indépendantes les unes des autres. C'est une conception que j'appellerais volontiers «leibnizienne», car c'est dans la philosophie de Leibniz qu'on trouve des monades qui contiennent en elles-mêmes tout leur devenir, privées de portes et de fenêtres, c'est-à-dire sans interactions les unes avec les autres. L'état initial comme cause nous oblige à renoncer à cette image : chaque événement y a une multitude de causes; c'est l'état du système entier et donc de chacun de ses éléments qui détermine l'état du système entier, c'est-à-dire de chacun de ses éléments, et l'image d'un réseau convient beaucoup mieux que celle de chaînes.

Ceci se voit aussi lorsqu'on cherche à donner une forme logique à la relation causale. On pense bien sûr à l'implication, et on a l'impression que la cause entraîne l'effet de la même manière que la proposition p entraîne la proposition q .

Mais un examen plus attentif montre que les choses ne sont pas aussi simples. L'implication logique signifie «jamais p sans qu'on ait aussi q ». Or, bien qu'on puisse dire que la cause pour laquelle la lampe de ma chambre s'est allumée, c'est la pression de mon doigt sur l'interrupteur, on ne peut pas dire qu'il n'y ait jamais manœuvre de l'interrupteur sans que la lampe ne s'allume. Il peut arriver que le filament de l'ampoule se soit brisé, que les contacts de l'interrupteur soient oxydés, qu'un fusible ait grillé ou qu'il y ait une panne de secteur. La forme logique

convenant à la causalité, ce n'est donc pas :

$$p \text{ entraîne } q$$

mais plutôt :

$$(p_1 \text{ et } p_2 \text{ et } p_3 \text{ et } p_4 \dots) \text{ entraînent } q$$

ou :

$$(p_1 \text{ et } c) \text{ entraînent } q$$

si l'on baptise un peu artificiellement du nom de c l'ensemble des conditions annexes qui doivent être remplies pour que p entraîne effectivement q .

Comment traiter ces conditions annexes ? Ou bien on essaye de débrouiller dans le détail cet écheveau compliqué, d'énumérer exhaustivement quel ensemble de conditions doit être réalisé pour que l'effet se produise à coup sûr et dans quels autres concours de circonstances il ne se produit jamais.

Ou bien on laisse ces conditions annexes ouvertes, et alors l'effet ne dépend plus que de façon aléatoire des causes qu'on a retenues : il se produit avec la probabilité qu'on peut attribuer à la conjonction de ces conditions annexes. C'est ce qu'on peut appeler hasard par description incomplète du phénomène : on ne contrôle qu'une partie des éléments déterminants et ceux qu'on a laissés de côté perturbent une prévision basée sur un dossier incomplet.

Autre remarque : la forme logique se justifie dans un cadre qualitatif, sous le règne du tout ou rien, où les causes et les effets sont ou ne sont pas. Elle devient très insuffisante dès qu'on essaye de quantifier, dès qu'on veut distinguer des degrés de réalisation, des intensités des causes et des effets. Par exemple, on peut se poser la question de la relation entre la fumée du tabac et le cancer du poumon en termes qualitatifs : le sujet a ou n'a pas l'habitude de fumer, il présente ou ne présente pas un cancer du poumon. Mais on peut aussi essayer de trouver une fonction reliant la mortalité due au cancer du poumon à la quantité de cigarettes (ou au poids de tabac) fumés quotidiennement. La notion de fonction permet une analyse plus fine et plus souple, et des prévisions quantitatives.

C'est la raison pour laquelle certains philosophes des sciences, Mach [1] en particulier, préconisent le remplacement de la notion de cause par celle de fonction, fonction à plusieurs variables et à plusieurs valeurs. Des sciences pures, très mathématisées, telles que la physique, ont bien évolué dans ce sens : la fonction y règne en maître et on n'y parle pratiquement plus de causes.

Est-ce à dire que le concept de cause unique, ponctuelle, doit être totalement abandonné au profit d'une relation fonctionnelle pluraliste où tout est cause de tout ? N'y a-t-il aucune raison et aucun moyen de privilégier certains éléments de cette complexion globale ?

Deux voies peuvent être proposées dans cette direction.

La première est de substituer à la cause absolue (ou intégrale) une cause différentielle. C'est-à-dire d'appeler cause et effet non pas des éléments de la situation initiale ou finale, mais des *différences* dans le comportement de ces éléments. On dira ainsi que telle différence dans les états finals est due à telle différence dans les états initiaux, par exemple que si deux plantes mises dans les mêmes conditions présentent une croissance très différente, c'est dû au fait que l'une a reçu tel engrais et l'autre non. En ne variant qu'un élément à la fois, on peut retrouver — de façon un peu artificielle — quelque chose comme la cause de telle modification dans les effets.

L'autre voie pour retrouver une cause privilégiée, c'est de quitter la science pure pour la technologie.

C'est en effet dans les sciences appliquées, dans l'utilisation des sciences pures à des fins humaines que la notion de cause a gardé toute sa force et son utilité. On parle toujours de causes en médecine, en technologie (cause de pannes, d'anomalies dans le fonctionnement), en pratique judiciaire (détermination des responsabilités de divers agents). À mon avis, c'est dans ce cadre que le terme 'cause' prend tout son sens. Primitivement, la cause n'est pas un concept métaphysique ou spéculatif, c'est un concept *pragmatique* : la cause, c'est ce sur quoi on peut en principe agir pour contrôler un phénomène, pour le provoquer si on en a besoin, pour l'éviter s'il est néfaste. On a rappelé lundi le vieil adage : *sublata causa, tollitur effectus*. C'est, comme le dit Collingwood [2], un levier, ou Gasking [3], une recette. Et on n'a véritablement prouvé qu'un phénomène (A) est cause d'un autre (B) que si l'on réussit à provoquer ou à supprimer B à volonté en agissant sur A.

Bien sûr, cette condition ne doit pas être prise au pied de la lettre : ce n'est pas parce que nous ne pouvons pas agir de façon sensible sur le mouvement de la lune que nous perdons le droit de déclarer que celle-ci est la cause des marées. Il suffit que nous ayons toutes les raisons de penser que nous pourrions agir sur les marées en modifiant la position de la lune, et que nous puissions effectivement agir dans des cas analogues (où par exemple nous pouvons provoquer arbitrairement les mouvements de certaines masses en agissant sur la disposition de masses voisines). D'ailleurs comme seules les positions relatives importent, on peut agir sur la position du petit corps plutôt que sur celle de l'astre et utiliser par exemple le puits de potentiel mobile de Jupiter ou de Saturne pour accélérer un satellite. On peut donc augmenter ou diminuer à volonté l'attraction exercée sur le satellite en le faisant passer plus ou moins près de la planète.

Voilà. Je crois avoir dit sur la causalité tout ce que je pouvais utilement en dire dans le temps qui m'est imparti.

Reste le problème de la découverte, de l'établissement des relations causales. À quoi reconnaît-on que A est cause de B ?

Le philosophe anglais Hume [4] a montré qu'il n'y avait aucune nécessité dans la relation causale, que seule l'expérience pouvait nous la faire découvrir. Il en

conclut hardiment que la causalité n'est rien d'autre qu'une succession constante, à laquelle nous nous sommes accoutumés de telle sorte que lorsque nous constatons la cause, nous attendons l'effet.

Chacun voit immédiatement la parenté d'une telle conception de la causalité avec celle évoquée (mais non défendue) par M. Delattre, où corrélation et causalité seraient simplement synonymes. Certes, personne ne soutient ouvertement cette opinion, mais n'est-ce pas là une prémisse implicite de quelques conclusions hâtives ?

Prenons l'exemple de l'association entre la fumée de cigarette et le cancer du poumon. Les auteurs de *The Health Consequences of Smoking* [5] se posent, au sujet de cette association, cinq types de questions :

- a) est-elle consistante, c'est-à-dire y a-t-il concordance entre les résultats des différentes enquêtes ?
- b) est-elle forte, c'est-à-dire l'usage du tabac est-il un facteur important ?
- c) est-elle spécifique, c'est-à-dire la cause présumée a-t-elle toujours cet effet, ou l'effet est-il toujours provoqué par cette cause ?
- d) y a-t-il la relation temporelle attendue, c'est-à-dire la cause présumée est-elle suffisamment antérieure à l'effet pour pouvoir le provoquer ?
- e) est-elle cohérente avec d'autres faits connus, avec ce que nous savons dans le domaine concerné ?

Cette discussion paraît être assez dans la ligne de Hume, c'est-à-dire de la causalité comme succession constante — ou fréquente. (Mais n'en déduisez pas que je considère les conclusions de ce rapport comme mal fondées ! Au contraire, la discussion des résultats et les réponses aux objections sont un modèle de réflexion épistémologique clairvoyante et rigoureuse.)

Une telle conception de la causalité comme succession régulière n'est pas à l'abri de toute critique.

D'abord, il y a des contre-exemples fameux : le jour et la nuit se succèdent régulièrement, et pourtant il ne viendrait à l'idée de personne de dire que le jour est cause de la nuit, ou la nuit cause du jour.

Cet exemple montre avec évidence qu'une simple association, succession ou corrélation ne suffit pas pour justifier une relation causale. Celle-ci doit être induite, tout comme n'importe quelle loi ou régularité. Il y a donc une induction causale.

Et ce qu'on induit, c'est une causalité productrice, permettant de contrôler l'effet, de le provoquer ou de le supprimer à volonté. Dans l'exemple choisi, ce qu'on cherche à établir, c'est que la fumée du tabac provoque une augmentation du risque de cancer du poumon et donc qu'en s'abstenant (ou en cessant) de fumer, on diminue ce risque. C'est une hypothèse comme une autre, et qu'il s'agit de vérifier à l'aide de la méthode utilisée habituellement pour vérifier les hypothèses.

Le schéma d'induction qui me paraît le plus satisfaisant, c'est celui basé sur le modèle probabiliste de Bayes [6].

Ce schéma a les particularités suivantes :

- Il ne permet de trancher qu'entre des hypothèses explicites, exhaustivement énumérées, ce qui a pour conséquence que l'oubli ou l'ignorance d'une hypothèse peut complètement fausser le résultat.
- Il fait intervenir, dans le modèle, une probabilité *a priori* des hypothèses qui est souvent très délicate à estimer.
- Il fait correspondre aux probabilités du modèle des plausibilités subjectives qui sont difficilement chiffrables.

Cependant, malgré ces faiblesses, il donne une image qualitativement fidèle du processus de l'induction. Et le résultat principal est que l'occurrence d'un événement E renforce l'hypothèse où E est le plus probable et diminue celles où E est moins probable. (L'événement E peut être simple ou composé, c'est-à-dire constitué par exemple par l'ensemble d'une série d'épreuves).

Ce schéma d'induction montre qu'il faut accorder la plus grande attention :

- d'une part aux hypothèses concurrentes;
- d'autre part aux épreuves choisies pour la vérification.

Les hypothèses concurrentes : il faut faire preuve d'une grande imagination, et inventer toutes sortes d'hypothèses concurrentes possibles; dans l'exemple tabac-cancer l'influence du sexe, de la classe sociale (ou classe de revenus), de l'exposition à d'autres cancérigènes, de la méthode d'enquête, etc.

Car il y a une sorte de transitivité de la liaison ou de la corrélation. La corrélation entre les variables X et Y peut être interprétée comme le cosinus d'un angle entre deux vecteurs dont les composantes sont d'une part les écarts des valeurs x_i obtenues par rapport à la moyenne \bar{x} , d'autre part les écarts des valeurs y_i par rapport à la moyenne \bar{y} . Certes, on peut trouver des exemples où la variable X est positivement corrélée avec la variable Y, la variable Y avec la variable Z et pourtant la variable X n'est pas corrélée avec la variable Z (ou corrélée négativement). Cependant, si les angles entre X et Y d'une part et entre Y et Z d'autre part sont suffisamment aigus, on peut en déduire que l'angle entre X et Z sera encore aigu, donc la corrélation entre X et Z positive.

Si la cause est positivement corrélée avec l'effet, tout phénomène suffisamment corrélé avec elle sera également corrélé avec l'effet.

Supposons que l'habitude de fumer soit corrélée par exemple avec la classe sociale et en particulier avec certaines habitudes alimentaires de cette classe sociale. Supposons en outre que ce soit ces habitudes alimentaires qui soient la véritable cause du cancer du poumon. Alors, il apparaîtra une corrélation entre l'habitude de fumer et le cancer du poumon bien qu'il n'y ait aucune relation causale entre eux.

Certes, on peut espérer que l'effet sera plus étroitement corrélé avec sa véritable cause qu'avec de telles pseudo-causes. Encore faut-il que la véritable cause figure parmi les hypothèses envisagées, sinon c'est la pseudo-cause qui risque d'être confirmée par les épreuves.

D'autre part, il faut bien choisir les épreuves. Car si, dans la série d'épreuves faites, la cause est toujours accompagnée d'un autre phénomène, l'hypothèse que c'est ce phénomène qui est la cause sortira tout autant renforcée que l'hypothèse correcte. Il faut donc choisir des épreuves où les différents candidats au titre de cause sont dissociés, c'est-à-dire essayer de briser les corrélations accidentelles pour qu'apparaissent dans toute leur netteté celles qui ne le sont pas.

En résumé :

Du point de vue de la science désintéressée et des rapports réels entre les choses, la causalité n'est pas très utile — la notion de fonction se prête mieux à l'analyse — et si l'on veut désigner quelque chose sous le nom de cause, ce serait l'ensemble d'un état antécédent.

Par contre, la notion de «cause» garde toute sa valeur dans les sciences appliquées, où l'on réservera plus spécialement ce terme aux éléments sur lesquels on peut — ou on pourrait — agir pour contrôler le phénomène, c'est-à-dire le provoquer, le doser ou le supprimer. Tant qu'il suffit de décrire, on peut se contenter de corrélations ou de liaisons, mais dès qu'il faut agir, la recherche des causes devient indispensable.

Quant à l'induction causale — la cause étant entendue dans ce dernier sens — elle n'est qu'une induction parmi d'autres, qui peut être décrite par le schéma de Bayes, où il faut faire avec le plus grand soin un inventaire aussi complet que possible des hypothèses concurrentes et choisir les épreuves de telle manière que les corrélations causales se détachent nettement des corrélations accidentelles.

Autrement dit, ici comme ailleurs, la valeur d'une conclusion statistique tient moins à la puissance des outils mathématiques utilisés qu'à la compétence et à la clairvoyance de celui qui prépare les données : les méthodes les plus raffinées ne permettront pas d'extraire d'un matériel statistique des informations qu'il ne contient pas.

Que les statisticiens veuillent bien me pardonner si j'ai enfoncé des portes ouvertes, si j'ignore une méthode-miracle ou si j'ai passé à côté des véritables problèmes.

Références

- [1] Ernat MACH : *La Connaissance et l'Erreur*, trad. M. DUFOUR, Flammarion, Paris (1908), p. 275 : «Quand les sciences sont très développées, elles emploient de plus en plus rarement les concepts de cause et d'effet. La raison en est que ces concepts sont provisoires, incomplets et imprécis. Dès qu'on arrive à caractériser les faits par des grandeurs mesurables, [...] la notion de fonction permet de représenter beaucoup mieux les relations des éléments entre eux».
- [2] R.G. COLLINGWOOD : *An Essay on Metaphysics*, Oxford (1940), part 3c.

- [3] Douglas GASKING : *Causation and Recipes*, Mind **64** (1985), p. 479-487.
- [4] David HUME : *Enquête sur l'entendement humain* (1748).
- [5] United States Department of Health, Education and Welfare : *The Health Consequences of Smoking*, DHEW Publication n° 73.8704 (1973).
- [6] Si l'on a un ensemble complet d'hypothèses H_i selon lesquelles l'événement E a les probabilités $p(E|H_i)$ de se produire, on a :

$$p(H_i|E) = \frac{p(H_i)p(E|H_i)}{\sum_j p(H_j)p(E|H_j)}$$

On montre facilement que l'occurrence de E renforce la probabilité des hypothèses selon lesquelles E est le plus probable et défavorise celles où E est moins probable.

Voir aussi G. POLYA : *Les mathématiques et le raisonnement «plausible»*, Paris (1958) en particulier ch. XV et note 8. (Édition anglaise : *Mathematics and Plausible Reasoning*, Princeton, 1954).

Discussion

J. PARAIN-VIAL — Pour appuyer ce qu'a dit M. Bonsack, j'ajouterais qu'il ne faut peut-être pas opposer les sciences fondamentales qui n'auraient pas besoin de la notion de cause et les sciences appliquées auxquelles elle serait indispensable. Les sciences fondamentales théoriques ne sont pas purement contemplatives; elles impliquent des activités d'intervention sur le réel, et d'intervention musculaire : observation, mesure, etc., et surtout l'expérimentation. C'est notre activité qui, au niveau de la connaissance vulgaire, mais aussi au niveau de la connaissance scientifique, articule le réel en objets, avant même de le transformer par des applications. C'est notre action sur la nature ou sur l'homme qui nous donne l'idée de cause que nous projetons sur les phénomènes que nous modifions pour transformer le réel. L'expérimentateur ne peut pas ne pas penser en termes de causalité quand il modifie la pression, la température, etc. Mais la description théorique et synthétique des faits peut se contenter de la notion de fonction.

F. BONSAK — D'accord. Et je crois qu'un départ fondamental de beaucoup de théories de la connaissance vient du fait qu'on traite l'observateur comme s'il n'était que passif, alors que sans action — sans action sur le monde, je ne veux pas simplement parler d'activité de la pensée — la connaissance ne peut pas être véritablement justifiée.

B. MATALON — Constater une corrélation entre deux variables n'est évidemment

pas suffisant pour conclure à la causalité. Deux différences sont importantes : la corrélation est symétrique, pas la causalité; la corrélation (au sens statistique) n'est pas parfaite, indiquant l'intervention d'autres facteurs. Ne faudrait-il pas remplacer la notion de cause par celles de condition nécessaire ou suffisante ?

F. BONSAK — Je n'ai pas voulu aborder le problème de l'irréversibilité temporelle de la cause, qui m'aurait mené trop loin, mais je ne nie pas son importance.

La distinction entre condition nécessaire et suffisante apporte une précision supplémentaire. Encore que la cause, pour autant que les circonstances annexes soient réalisées, devrait être une condition suffisante. Pourquoi devrait-elle être nécessaire ? Un même phénomène peut être produit alternativement par plusieurs causes. Le fait que le cancer du poumon puisse être aussi produit par des poussières d'amiante n'enlève rien à la fumée du tabac comme cause de ce même cancer.

C.P. BRUTER — J'avoue être quelque peu désarçonné par le contenu du premier paragraphe qui résume votre pensée. La donnée d'une relation fonctionnelle n'a d'intérêt profond, me semble-t-il, que pour autant qu'un raisonnement physique lui assure un fondement solide. Dans le cas contraire, nous nous trouvons devant un phénomène que nous ne comprenons pas. N'est-ce pas alors le propre de toute démarche scientifique que de chercher à résoudre les énigmes, que de faire reculer les limites de la *terra incognita* de notre ignorance ? Grands furent les progrès techniques de ces quarante dernières années. Peut-on en dire autant des progrès conceptuels ? N'est-ce pas en recherchant les causes des phénomènes que l'on en a découvert d'autres, plus fondamentaux, à la maîtrise desquels nous devons cette éclosion de gadgets techniques ? N'est-il pas dans la nature du destin prométhéen de l'homme que de s'interroger encore et toujours sur le miracle et la magie de la gravitation et de l'électro-magnétisme ?

F. BONSAK — Défendre une conception pragmatique de la causalité ne signifie pas renoncer à expliquer. Au contraire, la possibilité d'une action efficace passe souvent par la compréhension des mécanismes intimes du phénomène.

P. DELATTRE — J'ai une objection du même ordre que celle de Bruter à propos du rôle de la notion de cause en recherche fondamentale. Il me semble difficile de s'en passer. Bien entendu, la recherche des causes premières est métaphysique. Mais la recherche des causes immédiates est scientifique (la force de gravitation est cause de la forme du mouvement des planètes), indépendamment de toute action voulue ou envisagée.

F. BONSAK — Je n'ai pas dit que la cause était inutile en recherche fondamentale. J'ai dit que le sens primitif du mot cause venait de la technologie. D'ailleurs, la finalité à long terme de la recherche fondamentale est peut-être aussi la technologie, et il n'est pas étonnant qu'on recherche déjà dans les sciences pures sur quels facteurs on pourra agir lorsqu'on voudra les appliquer. J'ai utilisé moi-même dans l'exposé le terme de cause dans le contexte du mouvement des planètes. Et il

semble que bien souvent une recherche est d'autant plus féconde à long terme que le chercheur a réussi à prendre du recul par rapport à ses buts à court terme.

Th. MONLIN — Je suis tout à fait d'accord avec le point de vue de C.P. Bruter et de P. Delattre. En fait, il faut prendre conscience de la réaction naturelle de certains scientifiques : «Remettre en cause» les théories les mieux établies revient, actuellement, à réexaminer les notions d'espace et de temps (ou, comme le disait R. Thom, à essayer de comprendre certains phénomènes «énigmatiques» décrits par l'aléatoire ou faisant intervenir des actions à distance); et cela crée une atmosphère d'*insécurité* qui n'est pas agréable. La situation est caractéristique en Mécanique quantique : il y a des physiciens qui ont peur de remettre en question la belle machinerie fondée sur le hasard ! Et pourtant cela pourrait être fort utile, notamment pour la recherche de modèles utilisables en biologie.

F. BONSACK — Ces remarques sont intéressantes, mais sans connexion visible pour moi avec mon exposé.

B. RYBAK — Dans l'estimation des conditions de cancérisation, il faudrait considérer également si l'action est *directe* ou non. On pense notamment que plusieurs cancers sont les conséquences de virus de faible pouvoir pathogène et que la fumée du tabac, *par exemple*, renforce des facteurs qui dépriment la résistance de l'organisme, de sorte que l'agent *déclenchant* est la fumée du tabac, mais que l'agent *effectif* est un virus dormant. Il faudrait aussi considérer, par ailleurs, la polyallélie et la pleiotropie.

F. BONSACK — Une cause indirecte n'en est pas moins une cause. Même si le cancer du poumon est provoqué par un virus, la fumée du tabac ne représentant qu'un facteur facilitant, il n'en est pas moins vrai qu'on peut agir sur ce risque en supprimant la fumée. Par ailleurs, rien n'empêche un phénomène d'avoir plusieurs causes (c'est même la règle), ou une cause d'avoir plusieurs effets.

L. BAILLAUD — L'idée que «la cause, c'est ce sur quoi on peut en principe agir pour contrôler un phénomène» me semble se rapprocher très directement de la notion de «facteurs limitants» de la physiologie. Heller, par exemple, exprime cette notion en disant que «lorsqu'un phénomène biologique dépend de plusieurs facteurs, et que l'un de ceux-ci est manifestement très insuffisant, rien ne sert d'améliorer la valeur des autres». Cela s'exprime par la loi du minimum (Justus VON LIEBIG, 1843) : «Le poids de la récolte dépend uniquement du constituant nutritif le plus faiblement représenté», et par la loi des facteurs limitants de F.F. BLACKMAN (1905) : «Un facteur limitant impose une limite qui empêche d'une façon absolue l'effet des autres facteurs au-delà de cette limite, mais qui par contre permet le libre effet de ces facteurs en deçà de cette limite». Ces auteurs savaient très bien que le phénomène qu'ils considéraient était sous la dépendance de plusieurs facteurs, mais dans les circonstances précises considérées, c'est le facteur «limitant» qui, à lui seul, détermine la vitesse du phénomène.

Je voudrais faire une autre remarque au sujet de la recherche d'une «fonction»,

au lieu de la recherche d'une «cause» : cela ne doit pas être une excuse pour le manque d'imagination. Pendant le premier tiers de ce siècle, de nombreux physiologistes ont étudié le phototropisme végétal; ce sont ces recherches qui ont conduit à la découverte des hormones de croissance des végétaux : résultat non négligeable. Mais bon nombre de travaux se sont portés sur l'aspect quantitatif du phénomène, sur l'équation, sur les paramètres, etc...; et ce n'est pas cela qui a abouti aux résultats importants. On peut étudier la marche d'une automobile en la considérant de l'extérieur, mais on peut aussi soulever le capot pour voir ce qu'il y a dedans; c'est d'ailleurs souvent ce que fait le mécanicien quand il cherche «la cause» d'une panne.

F. BONSACK — Le facteur limitant de M. Baillaud devient effectivement le point privilégié qui permet de contrôler le phénomène. donc la «cause» telle que je l'ai décrite.

Pour la seconde remarque, voir ma réponse à M. Bruter.