

LE MODELE EN QUESTIONS

Anne-Marie Drouin

Derrière la multiplicité des emplois du terme de modèle, peut-on supposer que se cache un concept unique, ou doit-on en rester à un constat d'hétérogénéité ? Cette question a été débattue au cours d'un séminaire dont le texte qui suit se fait l'écho. Sans vouloir aboutir à une définition unique et fermée, cette réflexion tente de trouver des cohérences au milieu des contradictions. L'analyse d'un modèle en biologie illustre un certain nombre des caractères mis à jour dans cette étude.

un choix de réflexion théorique en liaison avec des recherches didactiques

Lorsque la réflexion didactique s'intéresse au concept de modèle, cela naît, entre autres choses, du constat que malgré le rôle important des modèles et de la modélisation dans les sciences expérimentales, l'école prend rarement en compte cette dimension de la démarche scientifique. Cette rareté peut susciter des recherches de type didactique mais elle souligne aussi, et en même temps, la nécessité d'une réflexion théorique qui permette de clarifier ce dont on parle quand on parle de modèle ou de modélisation.

Ainsi, parallèlement aux recherches mises en place dans des classes et dont on verra quelques résultats provisoires dans ce numéro, une réflexion, se situant d'emblée sur un plan théorique, a été menée au cours d'un séminaire où c'est le concept de modèle en tant que tel qui a été examiné.¹

1. MODELE : UN CONCEPT ECLATE

Ce qui frappe tout d'abord lorsqu'on aborde une réflexion sur le concept de modèle, c'est la diversité de ses emplois. Et l'une des questions qui a ouvert le débat sans cesser d'être présente,

(1) Ce séminaire s'est déroulé au cours de l'année 1986-1987 et y participaient les membres de l'équipe de coordination du groupe de recherche en didactique des sciences expérimentales (Esciex, INRP, DP1). Le présent texte n'est pas une traduction fidèle de ce qui y a été dit mais plutôt une sorte de "témoignage intellectuel" d'un "vécu théorique" où la réflexion personnelle, nourrie de la réflexion collective, se développe aussi de façon autonome. Précisons enfin que l'analyse philosophique ici développée ne prétend pas être exhaustive sur le sujet, ni traduire une maîtrise totale de tous les aspects des exemples scientifiques évoqués.

au moins de façon latente, est celle de savoir s'il est utile et pertinent de vouloir unifier les définitions du modèle, même s'il ne s'agissait que de retracer les liens entre divers sens apparemment étrangers l'un à l'autre.

Ce concept est, en effet, souvent employé de manière contradictoire ou abusive au point d'être considéré par certains comme un simple effet de mode.

On a pu se demander par exemple s'il était légitime de parler de modèle à propos de démarches et de discours du passé qui n'employaient pas ce terme, mais plutôt le terme de "loi" ou de "théorie" : une réponse négative à une telle question correspondrait à une tendance un peu restrictive de l'emploi de ce concept. En effet, actuellement, on parle volontiers du modèle Ptoléméen, ou Galiléen en astronomie, ou bien du modèle particulaire ou ondulatoire de la lumière, bien que ces expressions, si l'on se place d'un point de vue historique, soient en fait anachroniques.

A l'opposé, on a pu se demander si le concept de modèle n'est pas simplement ce qui caractérise une certaine conception de la démarche scientifique comme construction de l'esprit, visant à rendre compte des phénomènes, à les prévoir, à les mesurer, en un mot si la science toute entière ne pouvait être considérée comme un modèle : répondre affirmativement à cette question correspondrait à une tendance globalisante où le Grand Tout gomme toutes les différences.

Espérer trouver une définition unique, est sans doute chimérique, mais en rester au constat de l'usage "éclaté" du terme de modèle n'est pas satisfaisant. Le désir de mettre à jour les liens ou des oppositions entre divers usages du concept, du moment qu'il ne s'accompagne pas d'une volonté normative à courte vue, est sans doute un désir très avouable. Tenter de s'orienter dans les usages multiples du concept de modèle n'a pour but que de trouver quelques points d'ancrage où des discours d'horizons ou de disciplines différentes puissent mettre à jour ce qui leur est spécifique, et discerner si derrière un emploi commun de vocabulaire il y a aussi l'emploi d'un concept commun ou voisin.

2. LES RESONANCES DU CONCEPT DE MODELE

En sciences, le concept de modèle a des résonances qui évoquent aussi bien les images et schémas que la théorisation sans figuration, ou la mathématisation. Et l'on peut à juste titre se demander s'il y a lieu de rassembler sous un même concept des "choses" aussi différentes que les maquettes utilisées en astronomie pour comprendre le mouvement des planètes, ou en technologie pour comprendre le fonctionnement d'un objet technique, les analogies hydrauliques qui rendent compte de certaines propriétés du courant électrique, les sché-

l'usage du concept de modèle peut-il être rétrospectif ?

éviter de trop réduire l'emploi du concept, éviter de trop l'étendre

un désir très avouable : repérer des convergences

mas et diagrammes qui mettent en évidence des relations entre divers éléments (par exemple entre des organes en biologie), les modèles particuliers de la matière, les équations mathématiques traduisant les relations entre une population de proies et de prédateurs etc. ?

Devant une telle diversité on ne peut qu'éprouver le besoin d'explorer le concept de modèle. Et si l'on fait l'hypothèse que ce n'est ni le hasard ni l'arbitraire total qui ont fait donner le même nom à des choses si différentes, il n'est pas vain de tenter de trouver un fil d'Ariane dans cette multiplicité.

Dans un article de 1967², Raymond Carpentier n'hésitait pas à faire remonter la réflexion jusqu'au "**modèle à imiter**" (l'enfant modèle, le modèle de vertu, voire le modèle d'écriture ou le modèle d'un peintre), en passant par le "**modèle copie**" (qui est alors un exemplaire, une illustration d'une catégorie, c'est-à-dire un objet qui représente un type), jusqu'au "**modèle catégorie**" (dans le vocabulaire de la confection par exemple, un modèle représente toute une catégorie de vêtements semblables). Et à partir de ces trois sens pris dans la vie courante, mais non exempts de coloration philosophique, était menée une réflexion dans laquelle les caractères épistémologiques du modèle survenaient comme des glissements de sens successifs et des oppositions où le modèle à imiter devenait le **modèle imité**, puis le **modèle représentatif**. Et l'on voyait alors se poser les antiques questions du rapport entre les modèles et les phénomènes qu'ils représentent, - ou, dans la perspective platonicienne, le rapport entre l'Idée et la chose - et de là pouvait se développer une interrogation sur le statut des modèles.

On ne refera pas ici ce cheminement, qui prend le risque de confronter ce qui est dissemblable (la petite fille modèle au modèle mathématique) mais il était nécessaire de rappeler que ce cheminement est possible et qu'il suggère que derrière l'apparent arbitraire peut se cacher du sens.

La réflexion se centrera plutôt ici sur les modèles dans les sciences et plus précisément dans les sciences expérimentales, en renonçant à un tour d'horizon global des diverses sciences³. En effet, même si l'on ne considère que la physique et la biologie, on n'échappe pas pour autant à la multiplicité. Et on trouvera aussi, au détour de la réflexion, ce qu'on pourrait appeler des "concepts amis", ou voisins, dont on pourra parfois se demander s'ils ne seraient pas plus adaptés que mo-

derrière la trivialité
des mots peut se
cacher du sens

une réflexion cen-
trée sur la physi-
que et la biologie

(2) Raymond CARPENTIER, "Les modèles et leur ajustement au réel", *Economies et sociétés*, n1, janvier 1967.

(3) L'article "modèle" de l'*Encyclopaedia Universalis* fait d'ailleurs très bien ce travail qu'il n'est pas besoin de reprendre ici.

dèle, dans certaines situations : ainsi les concepts de "loi", ou de "théorie", ou même de "principe"...

Mais soyons dans un premier temps à l'écoute de quelques résonances du concept de modèle et des questions qui y sont associées.

2.1. Une première résonance : image ou schéma

le concret et l'abstrait

Dire que "modèle" évoque les images et schémas, c'est dire qu'un modèle peut être un objet concret (maquette, modèle réduit), un schéma simplificateur (sous forme d'image concrète, ou de mise en rapport d'éléments divers, sans figuration) ou une métaphore, une analogie (avec ou sans figuration concrète). Autrement dit, cette première résonance est elle-même multiple.

le figuratif et l'opératif

A ce stade, l'un des problèmes est de savoir si le modèle utilise des images ou schémas, ou si le modèle est l'image ou le schéma. Ce qui est en jeu ici est le statut du "figuratif" par rapport à l'opératif : le modèle doit-il être considéré comme un "objet pour penser avec", un schéma directeur, se traduisant souvent - mais non nécessairement - par une image ou un objet concret (ce qui supposerait que visualiser peut constituer une aide à la pensée) ?

l'analogie et ses usages

Ici se pose aussi le problème du statut du modèle comme analogie. Doit-il être considéré comme un simple moyen d'investigation au début d'une recherche, et comme n'ayant qu'une fonction heuristique ? Et doit-on alors dire avec Mario Bonge que les analogies correspondent au "stade juvénile d'une théorie", et que "le rôle de l'analogie et de l'inférence analogique dans les sciences factuelles se situe essentiellement au niveau de la construction de la théorie" ?⁴

Mais le modèle analogique peut être aussi un modèle a posteriori, mis en place pour la pédagogie ou la vulgarisation, et a dans ce cas une fonction de communication (par exemple en biologie, l'explication de la digestion par le modèle de l'usine correspond bien au besoin de se "représenter" les diverses "opérations"). Le modèle analogique a alors à voir avec le plaisir, qui passe ici par le besoin de ne pas s'en tenir à la sécheresse d'une structure abstraite, et en quelque sorte de l'"habiller" ou de lui donner de la "chair". Cet usage du modèle comporte certes le danger de faire croire que l'on a compris, mais ce danger n'est effectif que si l'on prend le modèle pour la réalité, ce qui, comme on le verra ci-dessous, serait un contre-sens.

(4) Mario BONGE, *Philosophie de la physique*, Paris Seuil, 1975, p 158.

le modèle et la
"réalité"

Si l'on prend le modèle dans le sens de "schéma simplificateur", d'autres types de problèmes se posent : pour rendre compte des apparences, le modèle doit en fait s'en écarter au départ. Un modèle doit être efficace et ne pas se perdre dans les détails non signifiants. Il y a donc un choix des éléments pertinents pour construire un modèle. On peut en ce sens considérer la mécanique classique comme un modèle des divers mouvements auxquels peuvent être soumis les corps. On y voit en effet des expériences "idéales" où est mis en scène le principe d'inertie. On a alors une structure dont les éléments sont dissociés des phénomènes perceptibles (on "néglige" les frottements) et solidaires entre eux (c'est la même loi qui pourra expliquer à la fois le mouvement et le repos). Dans ce contexte le problème qui est mis en oeuvre est celui du rapport à la réalité.

2.2. Deuxième résonance : théorie, lois, modèle et réalité

Comme on l'a signalé plus haut, la distinction n'est pas toujours nette entre modèle et théorie ou entre modèle et loi. Mais quel que soit le concept auquel on s'attache, une réflexion sur modèle, loi et théorie ouvre la question du rapport entre les phénomènes de la réalité et ce qui en est dit dans le discours scientifique, entre le "réel" et le "construit".

le modèle prend
ses distances

Par rapport à loi et à théorie il semblerait que modèle marque une grande volonté d'établir une distance entre discours scientifique et réalité. La théorie peut être conçue comme un ensemble (un "cortège" si l'on en croit l'étymologie du terme même de théorie) de lois qui sont ponctuellement explicatives et prévisionnelles, mais conçues souvent comme la traduction sur le plan intellectuel des phénomènes de la nature, alors que la notion de modèle s'avouerait plus volontiers et plus ouvertement comme un artefact, comme une interprétation plausible de la réalité, sans prétendre en être la traduction fidèle.

Pour illustrer ceci, on peut se référer à un texte d'Einstein et Infeld⁵, qui, bien qu'il n'évoque pas le concept de modèle en tant que tel, pourrait en illustrer des caractéristiques essentielles. On y voit en effet le savant face au monde, décrit comme un homme qui chercherait à comprendre le mécanisme d'une montre fermée : *"il voit le cadran et les aiguilles en mouvement, il attend le tic-tac, mais il n'a aucun moyen d'ouvrir le boîtier. S'il est ingénieux, il pourra se former quelque image du mécanisme, [...] mais il ne sera jamais sûr que son image soit la seule capable d'expliquer ses observations"*. Ainsi, si l'on veut appli-

(5) Albert EINSTEIN et Léopold INFELD, *L'évolution des idées en physique*, Lausanne, Payot, 1978, p. 34-35.

quer ces réflexions au concept de modèle, celui-ci se donne sans doute plus immédiatement comme contingent, partiel, comme un parmi d'autres possibles.

Et il arrive même que le modèle soit conçu comme permettant de mettre entre parenthèses ce qui est "à l'intérieur", faisant alors office de "boîte noire", avec une "entrée" et une "sortie", où des éléments quantifiables peuvent être mesurés et analysés. C'est notamment le cas de certains modèles en biologie.

Dans le champ d'une théorie générale, le modèle est parfois le point de vue ponctuel qui permet d'éclairer le réel par une analogie qui éloigne volontairement de la réalité (par exemple le modèle hydraulique pour décrire des phénomènes électriques), en soulignant une homologie de fonction entre deux réalités étrangères l'une à l'autre (un courant électrique conçu comme un courant d'eau). Des analogies de ce type sont parfois nécessaires, comme on le verra ci-après, pour servir de support à une mathématisation permettant la prédictibilité, ce qui ne veut pas dire que toute mathématisation passe par l'analogie.

2.3. Troisième résonance : la mathématisation

La mathématisation, donc, est associée à la formalisation et passe parfois par l'analogie. On peut reprendre un exemple donné par Francis Halbwachs ⁶ : "*... au XIXe siècle le modèle ondulatoire de Fresnel est calqué sur la théorie des ondes matérielles, avec une conception mécanique de l'éther comme milieu de propagation : enfin, comme couronnement, le modèle de l'éther de Maxwell, éther rempli de tubes qui tournent sur eux-mêmes et qui sont relayés par des billes de roulement, est un modèle de mécanisme incroyablement grossier, mais qui fournit rigoureusement les équations électromagnétiques de Maxwell !*" Un tel exemple laisse supposer que la loi mathématique est polyvalente puisqu'elle peut, grâce à des formules de même structure, rendre compte de réalités différentes.

C'est aussi ce que souligne Georges Canguilhem ⁷ lorsqu'il dit que "*dans la physique mathématique, telle qu'elle s'est constituée avec les travaux de Joseph Fourier* ⁸, *les théories mathématiques sont prises comme objet d'étude d'où surgissent des*

analogie et mathématisation

(6) Francis HALBWACHS, "La doctrine énergétiste", in *Histoire des sciences et psychogénèse, Cahiers de la fondation archives Jean Piaget*, n° 4, Genève, avril 1983).

(7) Georges CANGUILHEM, "Modèles et analogies dans la découverte en biologie", *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris Vrin, 1968, p. 312.

(8) Joseph Fourier (1768-1830), un des premiers enseignants de l'Ecole Polytechnique, connu pour des travaux sur la chaleur.

la loi mathématique est polyvalente

analogies sur des terrains expérimentaux a priori sans rapports. Ces analogies apportent la preuve de la polyvalence des théories mathématiques par rapport au réel. Pour reprendre les exemples qui avaient frappé Fourier, la propagation de la chaleur, le mouvement des ondes, la vibration des lames élastiques sont intelligibles au moyen d'équations mathématiquement identiques.

Il faut ajouter que la mathématisation donne au modèle la possibilité de mettre en relation des paramètres, qui, mis en oeuvre dans une expérimentation, susciteront de nouveaux paramètres, amenant ainsi une rectification du modèle. Il y a ainsi un balancement continu entre la formalisation et le retour au concret. Cette formalisation s'opère à travers des lois qui sont les éléments quantifiables et mathématisables du modèle.

2.4. Incidences sur les rapports entre la physique et la biologie

Les trois directions ainsi définies de la notion de modèle se retrouvent-elles à part égale dans les deux disciplines qui nous occupent ici ?

la modélisation en biologie passe-t-elle toujours par la physique ?

On associe volontiers l'idée de modèle mathématique aux divers domaines de la physique. Or la biologie semble moins facilement se prêter à la mathématisation. Il reste que la modélisation en biologie est possible, même si elle pose des problèmes spécifiques vu que le réel dont elle traite est moins facilement simplifiable que celui de la physique. L'analyse de Guy Rumelhard (dans ce numéro) en montre plusieurs exemples. Mais la modélisation en biologie a ceci de particulier qu'elle passe assez souvent, mais non toujours⁹, par des modèles empruntés à la physique, comme si la physique devait servir d'intermédiaire à la mathématisation. On en verra un exemple à la fin de cet article.

(9) En écologie les groupements végétaux ont été assimilés à des "super organismes" (c'est la vision de Clements) ou au moins à des "individus" (c'est la conception de Braun-Blanquet). On trouvera une analyse des analogies, métaphores ou modèles des écosystèmes in : Jean-Marc DROUIN, *La naissance du concept d'écosystème*, Thèse de 3e cycle, Université de Paris I, 1984.

3. MODELE ET EXPERIMENTATION

3.1. Le modèle, objet de substitution

S'interroger sur les modèles en sciences expérimentales ne peut se faire sans que se profile, derrière les mots, l'image de l'expérimentation elle-même. Et par contraste avec la "méthode expérimentale", certains parlent de "méthode des modèles". Ainsi Georges Canguilhem ¹⁰ évoque une *"différence de juridiction et de validité entre la méthode des modèles et la méthode classique d'expérimentation"*. Cette différence est ainsi exprimée : *"L'expérimentation est analytique et procède par variation discriminatoire de conditions déterminantes, toutes choses étant supposées égales d'ailleurs. La méthode du modèle permet de comparer des totalités indécomposables. Or, en biologie, la décomposition est moins une partition qu'une libération de totalités, d'échelle plus petite que la totalité initiale..."*

méthode
expérimentale et
méthode des
modèles

On voit qu'une réflexion sur les modèles induit des réflexions plus générales sur les méthodes scientifiques. Ici par exemple, on pourrait renverser les termes et considérer que ce n'est pas la méthode expérimentale qui est première, mais qu'elle n'est en quelque sorte qu'un cas particulier, et utilisée quand il n'est pas possible de voir de façon naturelle des variables séparées ¹¹. Ce qui caractériserait alors la méthode scientifique serait l'observation de variations concomitantes compatibles avec l'intégrité de l'objet, plutôt que l'expérience elle-même : l'idée de variation serait première par rapport à celle d'expérience, et le poids des sciences expérimentales comme "modèles" - au sens ici de "modèles à suivre" - de toutes les sciences, se verrait quelque peu diminué. On peut se demander si une telle perspective ne serait pas bénéfique à l'ensemble des sciences qui pourraient développer des méthodologies de validation adaptées à leur objet et à leur objectif, en s'émancipant d'un idéal trop prégnant, y compris les sciences "expérimentales" elles-mêmes.

la variation serait
première

Quoi qu'il en soit, il apparaît que le modèle a une fonction particulière par rapport à la connaissance ; il est une "construction de l'esprit" qui permet de mettre en place un ensemble de variables non directement accessibles à l'expérience, pour diverses raisons. Ce modèle est construit en fonction d'une certaine idée qu'on se fait du réel à étudier (liée à des observations, des connaissances antérieures, la formulation de problèmes...). Les éléments à manipuler sont liés en-

le modèle peut
être manipulé

(10) Ibid (7), p. 311.

(11) On trouvera également développé cet aspect du modèle biologique dans l'article de Guy Rumelhard de ce numéro.

tre eux soit par des structures abstraites (modèle planétaire de l'atome) et/ou mathématisées (modèle quantitatif des flux de matière et d'énergie dans un écosystème), soit par des schémas figuratifs ou des objets concrets construits en fonction de leur ressemblance analogique avec l'objet à étudier... Dans tous les cas le modèle constituera un objet de substitution permettant de travailler sur autre chose que le réel, qui pourtant figurera le réel, parce qu'il en reproduira certaines relations pertinentes.

3.2. Le modèle, processus ou produit fini ?

Quand on envisage le modèle du point de vue de la méthode, ce qui est pris en compte est un **processus** de connaissance reposant sur l'**utilisation** d'un modèle. Par contre, si on le distingue non plus de méthode expérimentale, méthode clinique etc., mais de **loi, principe, théorie**, le concept de **modèle** est alors envisagé du point de vue du "produit fini". Le problème qui est soulevé n'est plus celui du processus de connaissance, mais celui du **statut des énoncés**

On peut envisager ici également ce qui distingue **modèle de modélisation**. Là aussi on a une opposition entre produit fini et processus, mais le processus est moins général que dans la méthode des modèles. La modélisation est la démarche de **construction** d'un modèle, ou d'appropriation d'un modèle déjà construit, tandis que la méthode des modèles est centrée sur l'utilisation du modèle, c'est-à-dire sur les diverses fonctions qu'il peut remplir.

Au total, pour résumer ces distinctions entre "méthode des modèles", "modèle" et "modélisation", on pourrait dire que la méthode des modèles est une démarche scientifique qui utilise des modèles au sens où la méthode expérimentale utilise des expérimentations, le modèle est un produit conceptuel jouant comme un substitut de la réalité, et la modélisation est l'ensemble des démarches visant à construire ou s'approprier ce substitut.

4. LE MODELE ET SES RETOMBEES PHILOSOPHIQUES

Si le modèle peut se définir comme substitut du réel, le problème déjà évoqué plus haut du rapport entre modèle et réalité peut faire l'objet de remarques plus précises. Ce rapport peut en effet être envisagé dans deux types de problématiques qu'il convient de distinguer, l'une étant celle de la métaphysique et l'autre celle de l'épistémologie.

En ce qui concerne la **problématique métaphysique**, on a vu que l'intérêt de la notion de modèle est qu'elle "freine" la ten-

dance à confondre ce que dit la science avec la réalité : un modèle se donne ouvertement comme ne pouvant rendre compte de toute la réalité, et l'espoir d'une connaissance totale et définitive apparaît comme un rêve théologique. Les modèles sont en quelque sorte une garantie contre les illusions scientistes et permettent d'abandonner le projet d'une compréhension globale de l'univers.

Mais dans ce cas deux positions sont possibles. L'une consiste à penser que l'on peut considérer qu'il existe un réel "en soi", duquel la connaissance scientifique se rapproche de plus en plus sans jamais l'atteindre complètement ; l'image souvent utilisée est celle de l'asymptote. C'est dans cette perspective qu'Einstein comparait le monde "réel" au mécanisme interne de cette montre qu'on ne peut ouvrir ; on a besoin de supposer que ce mécanisme, à jamais invisible, existe, pour que la recherche d'une vérité objective ait un sens. L'autre considère que la référence à un monde "en soi" est inutile et qu'il est hasardeux de supposer que ce monde puisse forcément être intelligible et rationnel dans toutes ses dimensions. L'ambition de comprendre le monde devient alors encore plus modeste (ou plus lucide ?) et fait jouer l'idée que, selon l'expression de Michel Serres, le réel est certes intelligible, mais intelligible "par plaques".¹²

En ce qui concerne la problématique épistémologique, elle n'est pas sans liens avec la prise de position métaphysique, mais s'en distingue, en ce qu'elle peut faire l'économie d'un choix sur la pertinence d'un réel "en soi". Ce sur quoi elle se centre est l'ensemble des phénomènes tels qu'ils sont accessibles à notre observation ou notre raison. Le modèle peut y être conçu pour une utilisation ponctuelle et provisoire, avec une efficacité qui est fonction d'un problème posé (on pourra par exemple continuer à utiliser le modèle planétaire de l'atome pour rendre compte de ce qui se passe lors d'une réaction chimique). L'histoire des sciences fait apparaître parfois que, sur une même réalité, plusieurs modèles peuvent se succéder par "emboitements" successifs, par exemple la physique newtonienne devenant un cas particulier d'une physique relativiste ; ou au contraire par rejet d'un modèle ancien par un autre plus pertinent, par exemple, la cosmologie de Ptolémée rendue caduque par celle de Galilée : mais là encore, on peut penser que pour certains phénomènes une cosmologie géocentrique reste pertinente, comme pour rendre compte de la succession du jour et de la nuit, ou de la prévision d'une éclipse de Lune... Et il arrive aussi que des modèles opposés puissent se cotoyer

(12) Michel SERRES, "Commencements", une présentation de "La Nouvelle Alliance", *Le Monde*, 4 jan. 1980. La formule exacte de Michel Serres est : "Le réel n'est pas rationnel, il est intelligent. Et rationnel par plaques."

en se complétant après s'être combattus, comme c'est le cas des modèles corpusculaire et ondulatoire de la lumière. Ce qui compte alors n'est plus la fidélité à un hypothétique réel "en soi", mais l'efficacité descriptive, explicative ou prédictive d'un modèle dont la pertinence est validée en se confrontant au réel tel qu'il nous apparaît.

5. LES FONCTIONS DES MODELES

Le rapport du modèle à la réalité peut être de plusieurs sortes :

analogie...

- soit il est analogique : une ressemblance partielle entre deux réalités permet de mieux faire comprendre l'une par son rapprochement avec l'autre qui est alors appelée "modèle" (par exemple le "modèle hydraulique" pour les phénomènes électriques)

... mathématisa-
tion...

- soit le rapprochement entre deux réalités est rendu possible par le recours à un troisième terme qui a une analogie de structure avec deux ou plusieurs autres : c'est le cas des modèles mathématiques qui permettent des rapprochements entre des réalités qui à première vue sont très hétérogènes l'une par rapport à l'autre, comme celles citées plus haut par Canguilhem (la propagation de la chaleur, et la vibration de lames élastiques).

... prédictivité

- soit l'analogie n'est à rechercher ni dans la ressemblance apparente ni dans la structure cachée, mais dans les "effets" ; le but du modèle n'est alors plus d'expliquer, mais de "prévoir", sans se préoccuper de savoir si le modèle est "ressemblant" : pour reprendre l'image de la montre d'Einstein, il s'agirait de reproduire des mouvements identiques sans se préoccuper de savoir si le mécanisme intérieur est le même. On peut parler dans ce cas de "simulation".

Certains modèles semblent donc avoir pour fonction principale d'**expliquer**, d'autres plutôt de **prévoir**, c'est-à-dire d'anticiper par la pensée le déroulement d'un phénomène, à travers la théorie interprétative que constitue le modèle. Toutefois, prévoir et expliquer ne sont pas forcément associés.

Expliquer est une fonction qui peut être liée au besoin didactique ou au moment d'élaboration de la pensée ; l'explication pourra passer par l'analogie, ou par l'analyse des rapports entre les éléments du système qu'est le modèle.

Prévoir est la fonction liée à l'aspect mathématisé ou formel du modèle ; la prévision mettra en rapport le modèle et le réel et cette mise en rapport pourra servir à tester le modèle.

En tant qu'objet de substitution le modèle permet une **maniableté**, qui souvent se traduit par une simple démarche intellectuelle et non une manipulation concrète d'un modèle-maquette ; le modèle est un objet transformable, plus facile à "manier" que la réalité, mais qui pour en rendre compte correctement doit être confronté sans cesse avec elle.

Comprendre, expliquer, prévoir, calculer, manipuler, formuler des analogies, communiquer, rendre pensable ce qui est difficile à cerner, voici donc les fonctions qui se dégagent des divers modèles que l'on peut rencontrer. Toutes ces fonctions ne sont pas forcément présentes à la fois en un même modèle. Et par ailleurs, ces fonctions représentent des **tendances** plutôt que des catégories fermées. Un modèle peut avoir été construit pour une fonction et se révéler utile pour une autre...

6. UNE DEFINITION DE LA DERNIERE CHANCE ?

C'est une des raisons pour lesquelles on ne saurait établir une définition qui satisfasse à tous les cas particuliers de modèles. Pour autant l'hypothèse d'une cohérence cachée ou discrète demeure assez forte pour qu'on ne s'en tienne pas au simple constat de la diversité.

On pourrait, sans illusion, mais dans un désir de synthèse au moins provisoire, tenter une définition de la dernière chance. En effet, si on reprend les caractéristiques du concept de modèle telles qu'elles sont apparues jusqu'à présent, même si elles dévoilent plusieurs types de modèles possibles, on peut retenir quelques traits minima jugés nécessaires pour la pertinence du concept : le modèle est "quelque chose" (objet concret, représentation imagée, système d'équations...) qui se **substitue** au réel trop complexe, ou inaccessible à l'expérience, et qui permet de comprendre ce réel par un intermédiaire plus connu ou plus accessible à la connaissance ; mais ce substitut a parfois pour fonction, non pas d'expliquer un processus, mais d'en calculer les variations, de faire des "prévisions" alors même que le réel étudié garde son statut de "boîte noire".

Cette définition minima doit d'ailleurs être conçue non pas comme une norme absolue, mais plutôt comme un point de repère utile. Mais parce qu'une définition, fût-elle de la dernière chance, est sans doute un peu pauvre, on peut terminer cette réflexion par l'analyse d'un exemple précis de modèle, où l'on tentera de retrouver certaines caractéristiques dégagées au cours de cette réflexion.

7. UN EXEMPLE DE MODELE

Les problèmes posés par l'analogie dans la construction des modèles, et par la mathématisation, pourront être illustrés par l'exemple d'un modèle conçu dans les années trente qui est assez exemplaire à cet égard, et qui de plus met en scène la question du rapport entre modèles physiques et modèles biologiques ; il s'agit de l'analogie du "vase de Tantale" pour ren-

y a-t-il une définition de la dernière chance ?

une analogie physique pour un phénomène biologique

dre compte des variations appelées "oscillations de relaxation" dans les phénomènes de "dynamique des populations".

7.1. Des oscillations d'un genre particulier

Dans les années 1930, l'écologiste soviétique Gause a mené de nombreux travaux d'écologie expérimentale. Il s'agissait pour lui de tester les modèles mathématiques des relations proies/prédateurs établies dans les années précédentes par Lotka et Volterra. Ces modèles mathématiques prédisent des oscillations continues de la population de proies et de celle de prédateurs : les prédateurs faisant diminuer le nombre de proies voient à leur tour leur nombre diminuer puis le faible nombre de prédateurs amène une nouvelle croissance de l'effectif des proies, etc.

Les expériences d'"écologie en boîte de Petri" faites par Gause avec des populations de Protozoaires l'ont amené aux conclusions suivantes, résumées dans un article publié en 1953¹³ :

1) Les oscillations continues, prédites par les équations de Lotka et de Volterra, ne constituent en fait qu'un cas limite lorsque les conditions sont exceptionnellement favorables pour les proies, ou un artefact lorsqu'on réinjecte périodiquement dans le système de nouvelles proies.¹⁴

2) Dans les conditions les plus courantes de l'expérience et en particulier si les prédateurs sont voraces et efficaces, on aboutit à la disparition des proies, puis à celle des prédateurs eux-mêmes.

3) Cependant si on assure un apport d'énergie dans le système, non plus sous forme d'un apport périodique, mais sous

le vase de Tantale
de Gause et de
Le Corbellier

(13) G.F. GAUSE, *Vérifications expérimentales de la théorie mathématique de la lutte pour la vie*, Paris, Hermann, 1935, p. 61, (Act. Scient. et industr. 277).

(14) Gause rappelle (p. 41) que d'après les travaux de Lotka (1923) et Volterra (1926), la destruction d'une espèce (la victime) par l'autre (l'agresseur, le parasite) peut amener des fluctuations périodiques de la population des deux espèces. Cette théorie, dit-il, "est fondée sur certaines hypothèses des plus simples concernant l'action réciproque des agresseurs (N_2) et des victimes (N_1) qui ont été formulées comme une équation différentielle" :

$$d N_1 / dt = b_1 N_1 - k_1 N_1 N_2$$

$$d N_2 / dt = k_2 N_1 N_2 - d_2 N_2$$

($b_1 N_1$: accroissement géométrique des victimes

$k_1 N_1 N_2$: destruction des victimes par les agresseurs

$k_2 N_1 N_2$: accroissement des agresseurs

$d_2 N_2$: mortalité des agresseurs)

Gause précise que les prémisses de cette équation ne se trouvent être justes que pour les systèmes biologiques très primitifs.

des fluctuations
appelées oscillations
de relaxation

forme d'une immigration, constante et régulière, de nouveaux individus (proies et prédateurs), le niveau des populations subit alors des variations qui ne sont plus conformes au système d'équation de Lotka et de Volterra mais qui sont plus brutales et plus complexes : "il se crée, dit Gause, un type tout-à-fait nouveau de fluctuations dans les associations biologiques, ce que les physiciens nomment des oscillations de relaxation".

7.2. Le vase de Tantale

la description du
vase de Tantale

Pour décrire ces oscillations d'un nouveau type, Gause est amené à utiliser un modèle physique, celui du vase de Tantale qu'il emprunte à Le Corbeiller¹⁵ et il justifie son emprunt de la façon suivante : "L'exemple le plus simple et le plus démonstratif de l'oscillation de la relaxation est présenté par l'oscillation du niveau de l'eau dans le vase de Tantale (le Corbeiller, 1931). Il représente un réservoir dans lequel un courant d'eau tombe sans interruption, analogue à nos immigrations. Lorsque l'eau atteint le niveau H, le siphon commence à fonctionner (l'agresseur s'acclimate) et le réservoir se vide jusqu'au niveau h. Ensuite le processus se répète. Dans ce système d'une auto-oscillation nous avons par conséquent une source d'énergie constante, un seuil critique et une certaine partie spécifique qui fonctionne"¹⁶. A la suite de quoi Gause reproduit (p. 59) le schéma de Le Corbeiller (p. 6 de Le Corbeiller, 1931).

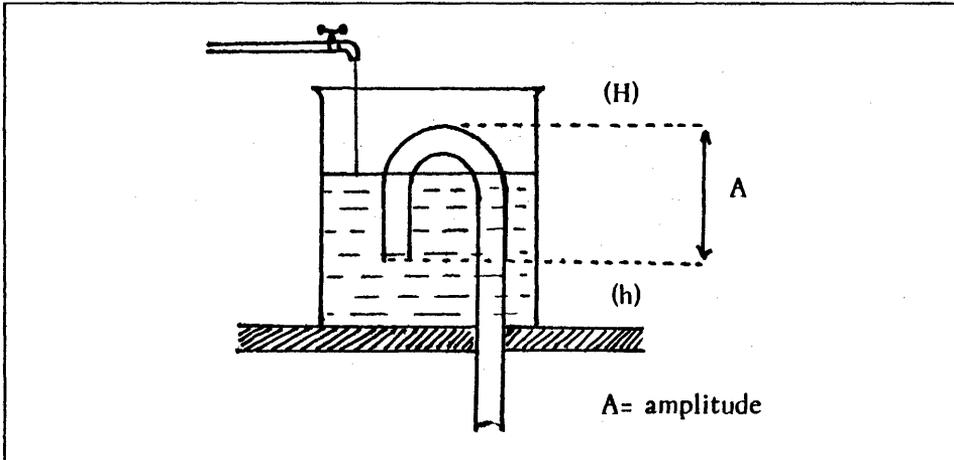
7.3. Les fonctions du modèle

une analogie sans
ressemblance
mais qui se veut
explicative

Bien qu'elle corresponde typiquement au cas où aucune ressemblance n'existe entre l'objet et son modèle, cette analogie veut avoir un rôle explicatif : Gause la qualifie en effet d'"*exemple le plus simple et le plus démonstratif de l'oscillation de relaxation...*". Mais il faut préciser que Gause souligne le caractère instrumental de ce modèle, qui n'est en aucune manière une description vraiment fidèle des fluctuations réelles : "*Revenant à nos associations biologiques, nous pouvons noter que la fluctuation ininterrompue classique, et la fluctuation de relaxation discontinue, ne représentent que deux types extrêmes nettement exprimés, et que dans le milieu complexe des systèmes biologiques véritables, des éléments des deux types peuvent évidemment participer*".

(15) Ph. LE CORBEILLER, *Les systèmes autoentretenus et les oscillations de relaxation*, Paris, Hermann, 1931.

(16) Le vase de Tantale est ainsi décrit par Le Corbeiller ; c'est un "réservoir dans lequel un robinet laisse couler continuellement un filet d'eau : un gros tuyau recourbé débouche à sa partie inférieure. Lorsque l'eau atteint le niveau (H), le siphon s'amorce, le réservoir se vide rapidement jusqu'au niveau (h), et le phénomène recommence." (p.6)



Le modèle est alors doublement distinct du réel qu'il décrit : en tant qu'il est purement analogique et que la réalité d'un vase qui se vide ne peut être confondue avec celle de populations d'animaux¹⁷ ; et en tant qu'il ne constitue qu'un cas extrême et non la traduction exacte d'un processus observable. Mais ce modèle permet une mathématisation du phénomène, et a une fonction prédictive : en effet, l'équation traduisant l'oscillation du vase de Tantale est plus facilement formulable que celle qui voudrait décrire les fluctuations des populations elles-mêmes, dans la mesure où, pour le vase de Tantale, on a affaire à un phénomène faisant intervenir des paramètres facilement identifiables (diamètre du tuyau de remplissage, dont va dépendre le débit d'entrée, diamètre du siphon, volume du récipient etc.) et des variables facilement calculables (débit d'entrée, temps de remplissage, temps de vidage...).

7.4. Ses traductions graphiques

On peut alors imaginer une courbe théorique du modèle de Tantale. Le Corbeiller lui-même la décrit et la calcule de la façon suivante :

"On voit que les oscillations du niveau de l'eau ont les proprié-

(17) Si l'on prend le texte de Le Corbeiller lui-même on y trouve d'autres analogies, au sein du monde de la physique, mais tout aussi étonnantes : après avoir décrit le phénomène du vase de Tantale, il en fait le prototype des systèmes autoentretenus, et présente le régime oscillatoire d'une lampe à néon comme très voisin du précédent, de même le régime oscillatoire d'un disjoncteur à maximum, dont il donne des traductions mathématiques et graphiques.

la courbe théorique de Le Corbellier

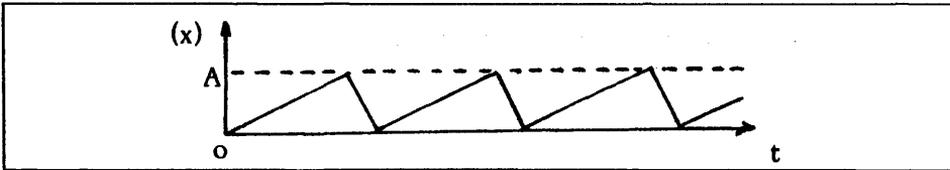
tés suivantes :

a) leur amplitude $A=H-h$ est bien fixée ;

b) leur période est entièrement arbitraire, on peut la faire varier à volonté en agissant sur le débit du robinet ;

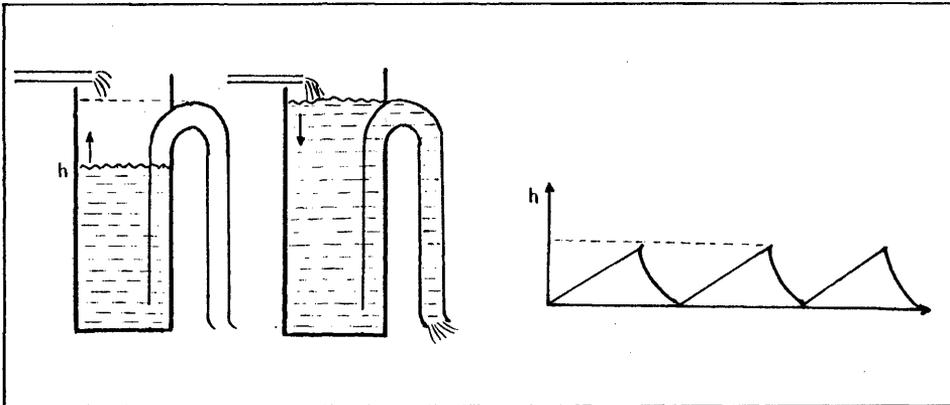
c) si V est le volume du réservoir entre les niveaux h et H , et D le débit du robinet, on a approximativement $T=V/D$, quotient de deux grandeurs physiques (pas de racine carrée);

d) enfin les oscillations conservent indéfiniment la même amplitude. La forme des oscillations en fonction du temps est donnée par la figure (ci-dessous). (p 6)"



une autre courbe incurvée

On trouve dans un ouvrage publié au Québec,¹⁸ d'autres traductions graphiques des phénomènes d'oscillations de relaxation. Le modèle de référence est le "lave-pipette" dont le mécanisme est ainsi décrit : "lorsque le niveau atteint le trop-plein, l'eau envahit le siphon et est drainée hors du réservoir. Lorsque le siphon est vide, la colonne d'eau du tuyau est rompue et l'action du siphon s'interrompt. Le réservoir se remplit alors de nouveau" (p 114). On a le schéma et la courbe ci-dessous :



(18) Michel CABANAC et Mauricio RUSSEK, Régularisation et contrôle en biologie, Les Presses de l'Université Laval, Québec, 1982, diffusion Vuibert, Paris.

Et les auteurs utilisent ce modèle de systèmes caractérisés par une entrée continue et une sortie intermittente pour éclairer en physiologie "*des exemples de périodicité analogues : comportements intermittents contrôlant les entrées, comme la prise de nourriture, d'eau, et le gain de chaleur par le comportement, ou contrôle des sorties comme la défécation, la miction, la thermolyse comportementale*" (p.114).

La différence des courbes de Le Corbeiller et de l'ouvrage canadien tient peut-être au fait que la section du siphon est représentée sur le schéma de Le Corbeiller comme très grosse par rapport à celle d'arrivée d'eau. Mais quoi qu'il en soit, cette courbe qui figure un phénomène physique, celui du vase de Tantale, n'est déjà, pour ce phénomène, que la traduction graphique d'une équation qui est une simplification du phénomène. Si elle devient un modèle pour le calcul de variation d'une population, on voit que cela procède d'une simplification extrême où l'artefact consiste à imaginer un "remplissage" régulier, semblable au débit constant du vase de Tantale, et où les analogies ont un caractère un peu inattendu : ainsi le débit d'eau est l'"analogue à nos immigrations" et le vidage du vase correspond au fait que "*l'agresseur s'acclimate*", c'est-à-dire devient plus efficace, faisant baisser brusquement le nombre de proies.

En résumé, on a bien dans cet exemple diverses fonctions du modèle :

- une analogie, qui n'est fondée sur aucune ressemblance, mais sur une homologie de structure. La fonction est explicative mais non représentative ;
- une mathématisation : la fonction est prédictive ;
- un objet de substitution, avec retour nécessaire au réel ;
- une simplification du phénomène.

Ce modèle est exemplaire puisqu'il met en scène un dialogue entre biologie et physique, entre réel et mathématique, objet technique (le vase lui-même) et théorie. On ne peut craindre de confondre le réel avec le modèle, mais on peut continuer à rêver sur le mystère des homologies de structure, ou à sourire de l'humour des savants.

8. EN CONCLUSION

La réflexion ici menée n'a pas abouti à concevoir une définition unique et définitive du concept de modèle. Ce n'était pas son but.

Mais que le concept de modèle pose problème était révélateur de questions, qui demeurent ouvertes, sur la démarche même des sciences expérimentales. Ainsi la question de l'expérimentation, celle de la formalisation, celle du statut du savoir scientifique et du rapport entre les diverses disciplines, tout cela s'est vu impliqué par la question du modèle. Il est apparu par

la simplification
d'une simplifica-
tion

les diverses fonc-
tions du modèle in-
carnées dans cet
exemple

exemple que le type de rapport qui existe entre le modèle et le réel dont il rend compte fait qu'une même réalité peut avoir plusieurs modèles et un même modèle peut répondre à plusieurs réalités. Le modèle peut servir alors à établir des relations entre divers types de réalités.

On a vu aussi que certains modèles sont en fait des objets, ayant une existence autonome, mais pouvant être utilisés comme modèle (le vase de Tantale). On peut alors considérer qu'un modèle est avant tout quelque chose qui fonctionne comme modèle (ce qui voudrait dire qu'un modèle est peut-être moins un "objet" qu'une fonction particulière attribuée à un objet).

La question du modèle constitue une part importante, sinon centrale, de la réflexion sur la démarche scientifique. On a vu que certains modèles pouvaient avoir des fonctions didactique et explicative efficaces, avec des limites à maîtriser. Et par ailleurs, lorsque des enfants se livrent à la démarche de modélisation il est difficile mais nécessaire d'établir une distinction entre ce qu'on devra continuer à appeler "représentations spontanées", ou "modèles tâtonnants". Peut-être trouvera-t-on aussi des modèles cohérents et efficaces "localement", mais encore assez différents des véritables "modèles scientifiques". Les conditions de possibilité pour maîtriser ces différences font alors l'objet d'une réflexion qui tend à montrer que le modèle est une des entrées possibles pour la didactique des sciences. Les diverses contributions présentes dans ce numéro en témoignent.

Anne-Marie DROUIN
Lycée de Corbeil
Equipe de didactique des sciences expérimentales, Institut National de Recherche Pédagogique

ANNEXE

Si l'on veut mieux cerner le statut de l'analogie rapportée ci-dessus on pourra se référer au texte même de Gause pour voir de façon plus détaillée en quels termes il pose le problème des variations de population ; au chapitre III, il étudie le cas de "Deux espèces dont l'une se nourrit de l'autre". A cette occasion il fait la remarque suivante : *"Actuellement il est admis par tout le monde que les fluctuations périodiques numériques de la population sont dues à ce qu'une espèce en dévore une autre, et sont un facteur puissant qui change la composition de la population et que par là ces fluctuations ont une grande importance évolutive. D'autre part ce n'est que grâce aux travaux théoriques de Lotka et Volterra que surgit devant les biologistes le problème d'une investigation de la nature des fluctuations périodiques elles-mêmes comme un problème tout-à-fait indépendant. Ceci paraît d'autant plus actuel qu'il existe depuis longtemps chez les physiciens des laboratoires spéciaux pour l'étude des fluctuations où l'on poursuit des recherches sur la nature des phénomènes périodiques dans différents domaines de la physique"*.

Dans cette remarque, il est intéressant de noter que Gause évoque d'autres analogies physiques que celle du vase de Tantale : les phénomènes d'oscillation simple ont déjà leur analogue dans la physique. Par ailleurs on a le sentiment que c'est la mathématisation du phénomène qui semble à l'origine de l'analogie physique, et que les limites du modèle mathématique vont susciter le recours à un nouveau modèle.

Le problème posé par Gause est le suivant : le parasitisme, ou l'agression d'une population par une autre, sont-ils régis par le hasard, ou par un choix sélectif ? Ce problème se complique par le fait que, dit-il (p.44) *"l'adaptation biologique qui s'est élaborée au cours de l'évolution - la faculté de discernement des parasites - altère fortement sous le rapport quantitatif les calculs qu'on peut faire en se fondant sur une simple acceptation de la théorie mathématique de la lutte pour la vie, quant aux collisions accidentelles des comportements d'une population mixte"*.

En effet, le système biologique le plus simple est celui qui est régi par le hasard, lorsqu'il n'y a pas d'adaptation spécifique de la part des agresseurs ; *"Un tel système s'approche le plus de ce qui a lieu lors d'une collision de simples molécules"*, précise-t-il p.45 (on notera au passage l'analogie physique de la collision de molécules...) et il présente ainsi le nouveau type de fluctuations auquel on doit avoir recours pour rendre compte de phénomènes où une population se voit renouvelée régulièrement (p.58-59) : *"Les fluctuations classiques ininterrompues de la population présumée par Lotka et Volterra peuvent être observées dans des associations biologiques très primitives où l'intensité de l'attaque des agresseurs contre les victimes n'est pas grande et où elle est soumise aux lois du hasard. Au cours de l'évolution du système biologique, il se forme des adaptations variées qui augmentent l'intensité d'attaque des victimes par les agresseurs. En fin de compte les fluctuations classiques se conservent seulement dans la zone près de l'origine des*

coordonnées où l'intensité d'attaque est affaiblie. Ultérieurement elles disparaissent et l'agresseur peut, ou bien ne pas s'acclimater, ou s'il s'acclimate, détruire les victimes jusqu'à la fin, et ensuite il s'éteint lui-même.

De cette façon il se crée un type tout-à-fait nouveau de fluctuations dans les associations biologiques, ce que les physiciens nomment des oscillations de relaxation. Ce qu'il y a de caractéristique pour ces oscillations c'est que dans des microcosmes clos (en l'absence d'immigration du dehors des agresseurs et des victimes) elles ne peuvent se produire, et le phénomène cesse (mort totale des victimes non-immunes au cours de la relaxation élémentaire, ou bien extinction des agresseurs) et qu'il faut pour que les oscillations existent, un afflux d'immigration". (Gause signale d'ailleurs qu'il a fait en 1934 des expériences de ce type).

Pour préciser sa pensée, Gause fait appel à un texte de Van der Pol où est décrite l'oscillation de relaxation (Van der Pol B., Proc. inst. Radio Engin. 22, p. 105, 1934).

A propos de ce texte de Van der Pol, Gause dit qu'il souligne que "ce qui est caractéristique pour les oscillations de relaxation c'est le fait que pendant la partie la plus grande de la période, le phénomène a une conduite typique apériodique ou asymptotique (population pure de victimes) et après cela, le système devient soudain instable (les agresseurs ou l'infection bactérienne peuvent s'acclimater) et le désordre passe d'une manière discontinue à une autre valeur et ensuite le même phénomène de décharge se répète de nouveau etc. de sorte qu'une oscillation de relaxation a le caractère d'un phénomène de décharge qui toujours se répète. La période de temps est donnée par un temps de relaxation, d'où le nom du phénomène".