Metz 1986

pour une révolution de l'intelligence dans l'enseignement des mathématiques... et ailleurs

Marcel Dumont

3. La position des mathématiques dans ce contexte

De toute évidence, il y a actuellement un divorce entre la population et les mathématiques (d'ailleurs y eut-il jamais un mariage autre qu'un mariage de raison au cours des derniers siècles ?). Ce divorce tient sans doute à une méconnaissance quasi totale de l'activité mathématique, ses finalités, méthodes et moyens. Quelle information peut-on en avoir, autre qu'au travers de la lucarne étroite de l'enseignement ? Une réforme malheureuse d'enseignement, aux intentions généreuses mais dénuée de réalisme, en sacrifiant le pragmatisme à l'idéologie, a élargi le fossé qui était déjà profond.

Plusieurs événements récents montrent qu'une lente prise de conscience de ce phénomène est en cours :

- le Palais de la Découverte, conscient du problème, a présenté 3 conférences de Serge Lang, mathématicien professionnel reconnu, sur le thème "Faire des Maths" [13] ;
- la Cité des Sciences et Techniques a accueilli et propose une exposition itinérante "Horizons mathématiques" créée par la Régionale A.P.M.E.P., l'IREM d'Orléans et la Maison des Jeunes de Bourges, animée par Michel Darche, conçue pour combler une petite partie du fossé ;

NDLR : Fin de l'article dont la première partie est parue dans le *Bulletin* (358 ; p. 125).

• la Société Mathématique de France vient de créer un prix de vulgarisation, et l'a attribué pour la première fois à l'équipe de rédaction de la revue "pour la Science" (traduction et adaptation du "Scientific American" — d'ailleurs en difficultés financières aux USA — où pourtant existe un prix de vulgarisation scientifique depuis plus longtemps) ;

• pour la première fois, semble-t-il, un numéro spécial du "Courrier du CNRS" [14] est consacré à quelques articles de "pré-vulgarisation" ("pré-vulgarisation" car les lecteurs visés sont des enseignants ou chercheurs toutes disciplines) ;

• un récent rapport américain souligne le paradoxe entre les ponts d'or qu'offrent les grandes sociétés à de jeunes chercheurs mathématiciens et le nombre de plus en plus faible d'étudiants s'orientant vers les mathématiques [7]. Un récent colloque de la SMF s'est tenu sur ce dernier point. Les difficultés de recrutement de jeunes enseignants en sont un aspect.

Bref, il semble que le problème soit mondial. Il découle naturellement d'une mauvaise communication. La Tour d'Ivoire des mathématiciens s'ouvrirait-elle sous la pression des événements ?

Que sont donc les mathématiques ? Plusieurs remarques préliminaires s'imposent :

• il n'y a pas de mathématiques sans mathématiciens ; si on peut définir de façon relativement précise les mathématiques du passé, nul ne peut définir les mathématiques du futur puisqu'elles seront ce que feront les successeurs des mathématiciens contemporains ;

• deux phénomènes opposés se déroulent presque constamment : d'une part des tentatives d'unification, d'organisation, d'autre part des divergences, des proliférations, des jaillissements de nouveaux langages, de nouvelles théories et techniques remettant en cause ou s'intégrant difficilement dans l'organisation qu'on croyait définitive. Ceci est caractéristique de la pensée humaine : nul ne peut la contenir dans des frontières, et c'est heureux ! ;

• il s'agit donc d'un phénomène social avec tous les avantages et inconvénients des comportements de l'être humain dans une société plus ou moins ouverte, selon les époques, sur le monde qui l'entoure ;

• un autre fossé souligne les difficultés de communication. En effet, à l'intérieur même des mathématiques, s'élargit ou se rétrécit, selon les époques ou les enseignements, un fossé entre ce que certains appellent "mathématiques pures" et "mathématiques appliquées". Un livre comme "Panorama des mathématiques pures" [15], bien qu'incompréhensible pour un non-initié, donne une idée de l'"altitude" des premières. Il serait utile de pouvoir comparer une telle synthèse (déjà ancienne — elle date de dix ans et tout va si vite — et peut-être partiale — le point de vue est celui d'un bourbakiste chevronné — à une synthèse analogue des mathématiques appliquées). Cette dernière existe-t-elle ? Est-elle possible ? [16]. Le fossé ne serait-il pas plutôt un marécage séparant deux marais ? De toutes façons, un lecteur de [15], averti ou non-averti, ne retrouvera strictement rien de tout ce que sa scolarité obligatoire et celle du baccalauréat inclus, lui a laissé en mémoire sous le nom de mathématiques. Chaque chapitre se termine par un paragraphe intitulé : "Rapports avec les sciences de la nature". Presque tous ces paragraphes contiennent l'expression laconique : "aucun pour le moment", ce qui en dit long sur les uns... et les autres [17] ;

• enfin, même parmi les mathématiciens que l'on peut qualifier de professionnels (j'entends par là, ceux qui, 24 heures sur 24 ou presque, dans leur tête quand ce n'est sur le papier, cogitent, mûrissent problèmes, idées et techniques appartenant aux mathématiques contemporaines), il semble qu'on ne trouve pas toujours le recul ou la volonté de recul suffisants pour juger de la nature et de la place de leurs activités dans le plus large contexte. Il est difficile de se préoccuper de ses préoccupations sans abandonner ces dernières, c'est-à-dire prendre un recul autant à l'extérieur qu'à l'intérieur.

Un exemple, à propos des Statistiques, de vision globale propre à frapper un non initié. Voici, en d'autres termes, la comparaison proposée par G.Th. Guilbaud dans l'un de ses cours :

En littérature et ailleurs, on comprend aisément qu'on veuille parfois extraire d'un roman, d'un livre, l'essentiel des informations qu'il contient, d'en faire un résumé, une synthèse, quitte à en privilégier ou négliger certains aspects, au gré du "résumeur". Les statistiques ont, dans le domaine numérique, une finalité comparable : extraire d'un tableau considérable de données numériques ou non, l'essentiel des informations qu'il contient, avec des méthodes aussi objectives que possible, c'est-à-dire indépendantes du "traiteur".

Ajoutons qu'en amont du traitement, il reste le problème de la collecte des données, avec la difficulté d'éliminer l'introduction involontaire ou volontaire de facteurs perturbateurs, ou d'oublier des facteurs essentiels... avant qu'on sache qu'ils sont essentiels ! Si on précise que, parmi les informations "résumées" figurent les liens plus ou moins étroits existant entre des facteurs plus ou moins apparents, on comprendra la lente mais sûre pénétration des statistiques dans des domaines aussi peu "mathématisés" que la recherche médicale et autres ;

• dernière remarque soulignant la nécessité d'une meilleure communication : à quoi peuvent bien servir les enquêtes sur les besoins en mathématiques de telle ou telle profession puisque 99 % de la population ignore tout de l'existence et de la puissance des techniques et machineries à penser actuelles ? D'ailleurs on trouve dans les dictionnaires usuels des définitions du style : "science des nombres et des grandeurs" ce qui nous ramène 2000 ans en arrière, "science de la mesure et du mesurable" ce qui nous maintient trois siècles de retard, etc.

Mais comment dire ce que sont les mathématiques actuelles sans pouvoir en faire ni dire ce que font les mathématiciens ? Les lignes qui suivent, avec leurs insuffisances et maladresses n'ont qu'un seul objet : susciter un tel débat dont l'enjeu n'est pas l'impérialisme d'une discipline, c'est la survie d'une civilisation.

Grosso modo, vues de l'extérieur par un quasi-profane, faute d'éclectisme, je propose trois idées-clés : "Les mathématiques sont essentiellement l'Art et la Science du Problème, de la Modélisation et de la Validation". Les trois étant étroitement enchevêtrés et pour cause : la modélisation d'un problème, le problème de la modélisation, la validation d'un modèle, le problème de la validation d'un problème, etc... en sont des aspects particuliers ; et c'est ainsi que prolifère la Cité ! Reste à préciser le sens de ces trois expressions.

D'abord, pourquoi l'Art ? Parce qu'il n'y a pas de mathématiques sans recherche, et qu'il n'y a pas de recherche sans une part importante de création, d'imagination, d'intuition, c'est-à-dire une part de rêve. Mais comme il n'y a pas d'intuition sans erreurs ni impasses, alors elle doit être constamment contrôlée, supportée, étayée par une "pensée rationnelle", caractéristique d'une Science. Le rêve est la nourriture de la pensée, la raison en est la diététique et on ne se nourrit pas avec des antiseptiques ! Malheureusement, les mathématiciens révèlent très rarement [18] les longs chemins, plus ou moins tortueux et parsemés de faux pas, de leur intuition ; ils ne livrent que le résultat de leurs recherches soigneusement épuré, aseptisé, c'est-à-dire "modélisé", "validé" et que reproduit l'enseignement.

Un travail, important à communiquer, serait de chercher le rôle et la place de l'intuition dans la pensée des grands créateurs et organisateurs (exemple : quels cheminements de pensée ont pu conduire Eilenberg et MacLane [20] à créer le langage des catégories et foncteurs ?). Ce n'est pas sans raison qu'un mathématicien comme David Hilbert a éprouvé le besoin de publier un livre intitulé "Géométrie intuitive" en 1932 [19] (traduit et adapté en différentes langues sauf en français, ce livre n'a toujours pas d'équivalent en langue française. Sa préface devrait être méditée par les responsables de l'enseignement des mathématiques).

Essayons de préciser le sens des trois expressions :

1) "Modéliser" (au sens large) signifie grosso modo "simuler" pour décrire, prévoir, résoudre un problème, et ... éventuellement comprendre. Mais alors que dans d'autres domaines, on crée des maquettes "maté-

rielles" que l'on fait fonctionner, en mathématiques on crée des codes, c'est-à-dire des écritures que l'on fait "fonctionner", c'est-à-dire avec des règles de transformations plus ou moins bien adaptées aux objectifs, là où le fonctionnement des langues naturelles ne le permet plus.

Ces "écritures" peuvent être le type séquentiel (c'est-à-dire qu'on construit des "mots" et listes de mots... à partir d'un alphabet, éventuellement enrichi au fur et à mesure des besoins : les divers systèmes de numération, au cours des âges, ont sans doute été les premiers essais de modélisation). Elles peuvent être aussi de type plus ou moins "figuratif" (figures, schémas,... graphiques en tous genres : dans ce cas, le souci d'interprétation l'emporte sur le souci de fonctionnement ; la géométrie grecque est peut-être un bon exemple de cette dualité : faute de pouvoir animer les figures, on a fait fonctionner la langue naturelle et le système de règles de transformations du discours s'est appelé "logique" au sens premier du mot).

Plusieurs remarques s'imposent :

• au bout d'un certain temps de pratique, l'individu finit par confondre le "modèle" avec la "situation" qu'il "représente". Dès lors il est prisonnier de ce modèle et n'en perçoit plus les bornes ; il pourra difficilement se poser d'autres problèmes que ceux qu'il a l'habitude de se poser ; s'il en pose, il restera le plus souvent incapable de les résoudre, faute d'un modèle adapté ;

• un exemple bénin : viendrait-il à l'idée de quelqu'un de se demander si : "le grand-père maternel de la mère du grand-père paternel du père de sa grand-mère paternelle est la même personne que le père de la grand-mère maternelle du grand-père paternel du grand-père maternel de son père ?". L'interprétation des écritures suivantes (10)0(11)1(01) et 1(00)(11)(10)1 ou de cheminements sur un arbre lui permet à la fois de poser le problème et d'y répondre. La langue naturelle, qui est un modèle parmi d'autres, devient un frein à l'évolution des connaissances. Mais elle les récupère après coup, grâce à sa souplesse, et devient ainsi un instrument plus ou moins rudimentaire de communication de ces connaissances ;

• d'autres domaines ont aussi leurs modèles : le solfège classique, les systèmes d'écriture de musique contemporaine, le tricot... plus ou moins apparentés aux langages de commande de l'informatique, le code génétique, etc. D'autres se contentent de puiser dans le réservoir des modèles mathématiques qu'ils connaissent, ceux qui paraissent le mieux convenir à leurs problèmes.

Dans tous ces domaines, l'objet d'attention reste toujours le problème qu'on a cherché à modéliser. En mathématiques, l'objet d'attention finit toujours par être le modèle lui-même et son fonctionnement. Dans un souci d'efficacité et de simplicité, une problématique se pose au niveau des premiers modèles que l'on cherche à leur tour à modéliser et ainsi de suite. Les mathématiques apparaissent ainsi comme une superposition de modèles de modèles de... modèles. Tout l'art de l'utilisateur revient à "court-circuiter" les niveaux d'interprétation. Un exemple : la modélisation des problèmes d'"arithmétique" a donné naissance, vers le XVI^e siècle, au calcul "algébrique" (ce concept datant de 3 à 4 siècles est encore le seul que délivre l'enseignement obligatoire !! : manier des lettres qui représentent des nombres). Des problèmes de résolution d'équations, dès la fin du XVIII^e siècle, conduisent avec Lagrange, Gauss, Abel, Galois puis d'autres, à l'élaboration d'un autre type d'algèbre où cette fois les lettres représentent essentiellement des permutations, c'est-à-dire finalement des actions, des "opérateurs". L'accent étant mis plus sur l'"organisation" que sur l'écriture, on a appelé ces nouveaux modèles, structures algébriques, ou algèbre dite moderne.

L'utilisation de ces modèles à propos de problèmes d'origine spatiale (dits de "topologie combinatoire" devenue "topologie algébrique"), dès le début du siècle, conduit Poincaré puis d'autres à "algébriser" cette algèbre elle-même : c'est l'algèbre homologique où les "lettres" représentent des "objets" de l'algèbre précédente (grosso modo !).

On remarquera la dualité entre l'évolution de la pensée et l'évolution des langages, c'est-à-dire des moyens de perception, d'expression, chacun ne progressant qu'à l'aide de l'autre. Enfin ces cascades de modèles superposés s'enchevêtrent les unes, les autres, repoussant sans cesse les tentatives d'organisation (cf les schémas de 15). Si on utilise parfois le mot "théorie" pour se donner l'illusion de mettre un point final à une telle cascade, on finit toujours par l'englober dans une "métathéorie" !

L'ésotérisme et l'abandon systématique des inteprétations initiales, font que ces "langages", vides de sens pour non-initié, deviennent très vite la cause essentielle du divorce entre les mathématiques et le grand public. Il ne reste que le jeu gratuit du problème.

2) En effet, l'essentiel de l'activité en mathématiques consiste à "soulever", "poser", "résoudre" des problèmes, classer, organiser ces problèmes, généraliser, "automatiser" les méthodes de résolution, etc. Là encore, un travail important à communiquer serait de chercher le rôle des problèmes pour l'avancement des mathématiques, et... des autres sciences. Polya l'avait commencé [21] ; l'IREM de Strasbourg avec Glaeser l'ont aussi tenté, mais avec une perspective d'enseignement [22]. On trouve dans l'introduction de [15] une classification des problèmes, tranchée par Dieudonné, dans une perspective soit de généralisation, soit d'illustration. Faute de compétence, je soulignerai seulement quelques points :

• pourquoi certains problèmes sont dits mathématiques et d'autres ne le sont pas ? Sans doute, la nature du domaine concerné par le problème, la forme de son énoncé ; la ou les méthodes de résolution ont-ils quelque chose à voir avec les mathématiques contemporaines... ou passées ? Cette question de forme est suffisante mais ne paraît pas nécessaire. C'est la possibilité de généralisation des méthodes qui tôt ou tard finira par les faire entrer dans le champ des mathématiques : le jour où des solutions à des problèmes d'échec pourront être modélisées, généralisées à des problèmes autres que le jeu d'échec, il est probable que modèles et problèmes deviendront mathématiques. De même pour des problèmes de pliage de papier (ou l'inverse c'est-à-dire que des théories issues de problèmes mathématiques trouveront une illustration dans un domaine qui, auparavant, ne relevait en rien des mathématiques : une histoire de la théorie des nœuds serait peut être intéressante à cet égard) ;

• un problème n'est pas un exercice d'application ou d'illustration (cf. [20] p. 28) d'une théorie, et encore moins l'exécution automatique d'un algorithme. C'est avant tout une question originale à laquelle l'auteur ne connaît pas a priori de réponses. L'originalité dépend évidemment du champ de connaissances donc d'une bonne communication. L'attitude interrogative est fondamentale, autant pour ceux qui tentent de résoudre les problèmes posés par d'autres que pour ceux qui les soulèvent. Malheureusement, dans leurs écrits, les mathématiciens français en particulier, en privilégiant l'exposé des solutions lorsqu'ils les trouvent, ont une fâcheuse tendance à dissimuler tout le champ interrogatif qui les guide ou les égare (fâcheuse à cause de l'exemple pour l'enseignement) ;

• parfois ces problèmes non résolus sont accompagnés d'un soupçon de réponse qu'on appelle "conjecture" tant qu'une "validation" ne confirme ou n'infirme cette réponse. Le déroulement s'étale parfois sur plusieurs siècles (cf. dans [14] l'article "Equations diophantiennes"). Dans certains cas, on arrive à "démontrer" qu'il est impossible de "démontrer telle ou telle réponse, ou encore qu'il n'y a pas de réponse, ou... que le problème est "mal" posé... !

Ainsi problèmes et conjectures sont le ressort moteur de l'avancement des connaissances et cela tant pour un individu que pour les Sciences elles-mêmes (en effet, au niveau même le plus élémentaire, la recherche d'une solution procède aussi par interrogations successives, chacune accompagnée de conjectures plus ou moins conscientes !).

3) Outre l'aspect de modélisation, de formalisation des problèmes, c'est sans doute l'aspect de validation — validation des méthodes, des réponses... — qui caractérise, tout au long des siècles, les mathématiques.

Les Sciences expérimentales ou dites telles tirent leur pouvoir de conviction de la compatibilité plus ou moins grande entre les perceptions reçues de l'extérieur et les états successifs du modèle au cours de son fonctionnement. Même lorsque les modèles deviennent mathématiques, comme en physique théorique, en cosmologie, ce sont encore des observations directes ou indirectes qui valident ou invalident l'interprétation du modèle.

Les mathématiques tirent leur pouvoir de conviction d'une compatibilité interne au modèle. En abandonnant toute interprétation, le mathématicien se concentre sur le fonctionnement non contradictoire du modèle. La validation se fait par une "démonstration", c'est-à-dire un autre modèle fonctionnant soit en langue naturelle, soit en langue formalisée, soit à mi-chemin entre les deux le plus souvent. En mathématiques, une théorie ne s'échafaude que sur une liste de démonstrations ; on évite toute interprétation en cours de fonctionnement pour assurer l'irréfutabilité du résultat.

Depuis les Grecs, avec Aristote, l'art du raisonnement c'est-à-dire du discours faisant appel à la "raison", constituait l'essentiel d'une validation s'appuyant uniquement sur une langue naturelle : c'était la "logique". La tentative de modélisation de l'espace, tentée par Euclide, est l'un des premiers exemples d'une théorie suffisamment bien validée pour subsister plus de 2000 ans. C'est d'ailleurs à cause de cette validation qu'elle a été, dans l'enseignement, le domaine privilégié de l'apprentissage du raisonnement. Mais c'est aussi, en partie à cause de ses insuffisances que cet "art du raisonnement", depuis 150 ans, est progressivement devenu une authentique "science de la validation" qu'on appelle "logique mathématique". Sans entrer dans les détails, disons seulement que, pour démontrer que la validation d'une démonstration de la validité d'un système de démonstrations est possible ou impossible, le support d'une langue naturelle ne suffit plus : il faut recourir à des modèles formels et des techniques spéciales dont l'ampleur et la portée sont ignorées par la plupart de nos contemporains (cf. [8] p. 21, ainsi que [23] art. "logique mathématique"). Des mots comme vrai ou faux s'estompent au profit de mots comme contradictoire, "consistance", "complétude", "effectif", "décidable", "calculable", etc. Inutile de dire que toutes les sciences sont concernées, peu ou prou, par ce champ immense d'activités, dès qu'elles créent ou utilisent des modèles.

Une telle vision, simpliste et grossière, au travers des trois axes que sont le problème, le modèle, la preuve, gagnerait à être étayée par des exemples, voire complétée, rectifiée, précisée. En outre, peut-on esquisser, vues de l'extérieur, les tendances actuelles ?

Les progrès fantastiques de l'informatique en quelques décennies, à l'aube d'une cinquième génération encore plus surprenante, semblent être à l'origine de ces tendances. En effet, la rapidité de traitement et la capacité des mémoires permettent de traiter des types de problèmes laissés un peu dans l'ombre : alors que les mathématiciens, la plupart du temps, s'occupent de problèmes d'existence, de cohérence... la machine permet d'aborder des problèmes de constructions effectives : problèmes portant sur des nombres gigantesques, comportant un grand nombre d'itérations ou nécessitant un algorithme très long... [14].

Quelques exemples :

• la recherche des groupes finis simples, échapant à la classification théorique prévue (ceux qu'on appelle les "monstres") vient de s'achever [24],

• la conjecture des 4 couleurs (colorier une carte avec 4 couleurs pour distinguer les pays voisins) a été validée par un balayage exhaustif de toutes les cartes possibles. La seule démonstration fournie concerne le caractère exhaustif du "balayage" (aucun cas n'est omis). Une telle validation n'entre donc pas dans le cadre d'un système entièrement déductif... et pourtant ! [25] ;

• itération de polynômes complexes et fractals [14] et [26]... etc.

Il en résulte trois conséquences importantes pour le futur :

1. l'introduction de méthodes expérimentales, de simulation, dans un domaine réservé à la déduction, sans pour autant remettre en cause les méthodes hypothético-déductives. "Les résultats obtenus, si parlant soient-ils, ne sont pas considérés comme des démonstrations... mais seulement comme des éléments de conviction" (cf. [14] p. 32 "ordinateurs et démonstrations" A. Douady). Pourtant, à l'intérieur même du système, imaginons une démonstration dont la seule lecture prendrait plus qu'une vie de mathématicien : qui la validera ? L'imagination de l'homme maintiendra-t-elle son avance sur la puissance de la machine ?

2. un retour en force du "discret" (c'est-à-dire grosso modo du "discontinu"), du "fini", mais d'un fini atteignant des "tailles" inaccessibles au sens commun (cf. le problème de Goodstein [27]) alors même que trois siècles de travaux à base de continuité ont à peine touché le grand public ;

3. enfin, un renouveau d'attrait pour des problèmes dits "concrets", c'est-à-dire présentant un attrait immédiat et... l'espoir d'une réussite proche ; ceci au détriment de l'acquisition des outils puissants que sont les théories contemporaines. Voir ce qu'en pense G. Faltings dans ([14] art. "La conjecture de Mordell") cité par J.F. Boutot et L. Moret-Bailly : "A ceux qui aujourd'hui étudient les mathématiques, je conseille donc d'apprendre les théories abstraites plutôt que de chercher des succès rapides dans les mathématiques "concrètes". Le développement des mathématiques s'accomplit par l'interaction de la théorie et de l'exemple. Livré à lui-même, aucun de ces deux rameaux n'est viable".

Ainsi est illustré le dilemme actuel : soit prendre la liberté de chercher soi-même, soit de soumettre à l'apprentissage de théories arides dont on ne soupçonne guère a priori l'intérêt. Pourtant, on ne peut à la fois regretter la disparition de l'esprit de recherche chez les jeunes et leur conseiller de longues études de théories abstraites.

Mais alors on peut se poser quelques questions :

• quels efforts ont été faits, sont faits pour rendre moins arides ces théories ?
• quels efforts sont faits pour communiquer des "idées", pour partager son savoir ? (cf. [28]).

Nous sommes ramenés aux problèmes de communication.. et de langages. La vulgarisation semble se mettre en marche, mais laissera-t-on encore longtemps l'enseignement faire du sur-place ? A quand le réveil de l'intelligence ?

Références *(suite)*

[13] *"Que fait un mathématicien pur et pourquoi ?"*, Revue du Palais de la Découverte n° 94-01, 1982 ou "Serge Lang, des jeunes et des maths", "Serge Lang fait des maths en public", Ed. Belin.

[14] *"Images des mathématiques"*, Revue "Le courrier du CNRS" suppl. au n° 62.

[15] *"Panorama des mathématiques pures"*, J. Dieudonné. Ed. Gauthier-Villars.

[16] Encyclopédie internationale des Sciences et Techniques (schéma des maths).

[17] *"Les mathématiques pures n'existent pas"*, D. Nordon.

[18] Voir dans les Oeuvres de H. Poincaré, D. Hilbert... et autres ?

[19] Trad. angl. *"Geometry and the imagination"*, D. Hilbert, S. Cohn-Vossen. Ed. Chelsea.

[20] *"Le langage des catégories"*, P. Hilton. Ed. Cedic.

[21] *"Comment poser et résoudre un problème"*, Polya. Ed. Dunod.

[22] *"Le livre du problème"*, IREM de Strasbourg. Ed. Cedic.

[23] Encyclopaedia Universalis.

[24] *"Le théorème géant"*, D. Gorenstein, Rev. "Pour la Science", 02-86.

[25] *"Les mathématiques aujourd'hui"*, Ed. Belin.

[26] *"Les objets fractals : forme, hasard, dimension"*, B. Mandelbrot. Ed. Flammarion.

[27] *"Une théorie géométrique des ordinaux"*, Girard, Rev. "Pour la Science", 07-85

[28] *"Penser les mathématiques"*, Ed. du Seuil.