

topologique $\text{Spec } A$ appelé spectre de A . L'espace $\text{Spec } A$ n'a pas de métrique naturelle (c'est-à-dire de fonction définissant une distance entre les éléments de $\text{Spec } A$) qui donnerait les ouverts de $\text{Spec } A$. Pourtant, la topologie de Zariski qui définit $\text{Spec } A$ en fait bien un espace topologique : pour $\mathbb{Z}$, par exemple, ce spectre est l'ensemble des nombres premiers auquel on adjoint 0, et ses ouverts sont la partie vide et les complémentaires des ensembles formés d'un nombre fini de nombres premiers. Pour un anneau quelconque, le spectre est l'ensemble des « idéaux premiers » (qui sont une généralisation des nombres premiers).

Avec le concept d'espace topologique, les mathématiciens ont vraiment l'impression d'avoir atteint un degré de généralité maximal, en quelque sorte indépassable. De fait, grâce à sa souplesse et à sa simplicité,

le concept connaît un grand succès et continue d'être le cadre naturel de la topologie générale. Aussi, si les limitations de cette notion d'espace sont apparues assez naturellement à Grothendieck à la fin des années 1950, il a fallu faire un effort conceptuel considérable pour imaginer comment les dépasser.

Un manque cruel d'ouverts

Pour Grothendieck, les limitations se font particulièrement sentir dans le cadre de la topologie (l'ensemble d'ouverts) que Zariski a définie, par extension, pour les variétés algébriques, car si elle est suffisante pour beaucoup de propos, elle « manque cruellement d'ouverts » : par exemple sur une courbe algébrique sur $\mathbb{C}$, les seuls

ouverts non vides pour la topologie de Zariski sont les complémentaires des parties finies de la courbe. Si l'on prend comme courbe la droite affine sur $\mathbb{C}$ (c'est-à-dire le spectre de l'anneau des polynômes à une variable et à coefficients dans $\mathbb{C}$), on trouve l'ensemble $\mathbb{C}$ des nombres complexes, et ses ouverts pour la topologie de Zariski sont la partie vide et les complémentaires des parties finies de $\mathbb{C}$, c'est-à-dire le plan privé d'un nombre fini de points. Tous les ouverts (à part le vide) sont donc très gros : on ne peut pas avoir de « petits » voisinages d'un point. En revanche, pour la topologie ordinaire sur le plan complexe, les ouverts sont les réunions quelconques de disques ouverts ; il y a donc beaucoup plus d'ouverts ! Par exemple, autour de chaque point, on peut prendre pour voisinages du point des disques ouverts de rayons aussi petits que l'on souhaite. Ainsi, des espaces X au-dessus d'une variété complexe – c'est-à-dire munis d'une application continue de X vers la variété – peuvent être localement très simples pour la topologie ordinaire sans l'être pour la topologie de Zariski.

Pour pallier cette difficulté, Grothendieck élargit la notion de topologie sur une variété en étendant celle des ouverts à prendre en compte. Il ne se limite plus aux parties ouvertes de la variété, mais accepte aussi certains espaces au-dessus des ouverts, appelés revêtements étales d'ouverts (voir l'encadré page 32).

Cette notion remonte en quelque sorte à Riemann et aux surfaces qu'il inventa au XIX^e siècle pour faciliter l'étude des fonctions multiformes, c'est-à-dire des fonctions mal définies parce qu'elles associent plusieurs valeurs à une même valeur de la variable. Puisque les fonctions donnaient plusieurs valeurs en un même point de l'espace de départ, Riemann a transformé l'espace de départ en feuillets superposés et recollés de telle façon que sur la nouvelle surface constituée – appelée depuis surface de Riemann –, la fonction n'associe plus qu'une seule valeur à chaque valeur de la variable.

D'après Luc Illusie, ancien élève de Grothendieck, l'idée de la localisation étale chez son maître remonte à avril 1958, à l'occasion d'un exposé de Jean-Pierre Serre au séminaire Chevalley. Jean-Pierre Serre avait remarqué qu'élargir la localisation d'un espace au-dessus d'une variété algébrique à des revêtements étales d'ouverts permettait de révéler certaines de ses propriétés. Enthousiaste, Grothendieck

La notion de faisceau

Un faisceau sur un espace topologique B n'est rien d'autre qu'un espace étalé sur B , une notion qui s'apparente à celle de revêtement étale (voir l'encadré page 32), mais qui est plus faible.

Un espace étalé sur B est un espace (E, p) au-dessus de B où p est une application qui a la propriété d'être un homéomorphisme local : autour de chaque point x de E , il existe un ouvert U de E le contenant tel que U soit une copie de son image $V = p(U)$ dans B .

Par exemple, les revêtements étales sont des espaces étales, mais la réciproque est fautive : l'inclusion de l'intervalle ouvert $]0,1[$ dans la droite réelle $\mathbb{R}$ fait de lui un espace étalé sur $\mathbb{R}$, mais ce n'est pas un revêtement de $\mathbb{R}$ (il y a un problème au-dessus de 0 et 1...).

En quelque sorte, pour un revêtement étale, on demande d'être très simple « localement en bas »,

c'est-à-dire sur B , et pour un espace étalé, on demande d'être très simple « localement en haut », c'est-à-dire sur E , ce qui est une condition plus faible.

À un tel espace étalé (E, p) sur B , associons un foncteur F_E défini sur l'ensemble des ouverts de B (c'est une catégorie) et à valeurs dans la catégorie des ensembles. Formellement, cela signifie qu'à tout ouvert U de B , on associe l'ensemble $F_E(U)$ des fonctions continues de U dans E qui, composées avec p , donnent l'identité de U . Alors pour U et V deux ouverts quelconques de B tels que V est inclus dans U , on a une application dite de restriction de $F_E(U)$ dans $F_E(V)$ qui, à chaque fonction sur U , associe sa restriction sur V .

On vérifie facilement que E peut être reconstitué à partir de F_E . On vérifie aussi la propriété fondamentale suivante sur F_E , dite propriété de recollement : si (U_i) est un recouvrement d'un ouvert U

de B (c'est-à-dire une famille d'ouverts U_i dont la réunion donne U) et si on s'est donné pour chaque i un élément s_i de $F_E(U_i)$ tel que les s_i soient compatibles deux à deux (pour tout i et j , les restrictions de s_i et de s_j sur l'intersection de U_i et U_j coïncident, alors il existe un et un seul élément s dans $F_E(U)$ dont les restrictions à chaque U_i sont précisément les s_i .

En résumé, des données « locales » compatibles (les s_i) permettent de définir une donnée « globale » unique (s) dans $F_E(U)$.

On part de cette définition de foncteur associé à un espace étalé pour définir la notion générale de faisceau sur un espace topologique B : un faisceau sur B est un foncteur sur la catégorie des ouverts de B vérifiant la propriété de recollement.

Cette propriété est ce qui permet de construire des objets globaux à partir de données locales – un outil d'une grande utilité en géométrie algébrique.

a repris l'idée pour élargir la topologie de Zariski. Il voyait même déjà comment cet élargissement aiderait à s'attaquer aux conjectures de Weil.

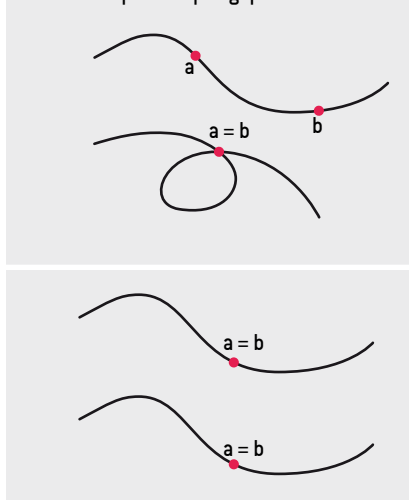
Depuis leur formulation, en 1949, par André Weil, un des membres fondateurs du groupe de mathématiciens Bourbaki (que Grothendieck a rejoint au début des années 1950), ces conjectures font miroiter l'idée que des relations existent entre des informations de nature arithmétique et la topologie. Weil les a énoncées alors qu'il menait des calculs sur le nombre de solutions de certaines équations algébriques dans des ensembles finis de nombres. En substance, les conjectures de Weil relient le nombre de certaines solutions d'une équation algébrique à des propriétés topologiques de la variété algébrique décrite par l'équation. Cette relation entre informations arithmétiques et topologie suggérait de construire une théorie plus subtile – une théorie cohomologique – qui permettrait d'englober les propriétés arithmétiques et topologiques de la variété. Grothendieck construira une telle théorie quelques années plus tard (la cohomologie étale) et prouvera une partie des conjectures ; la dernière sera démontrée en 1974 par son élève Pierre Deligne et lui vaudra une médaille Fields.

La genèse des topos

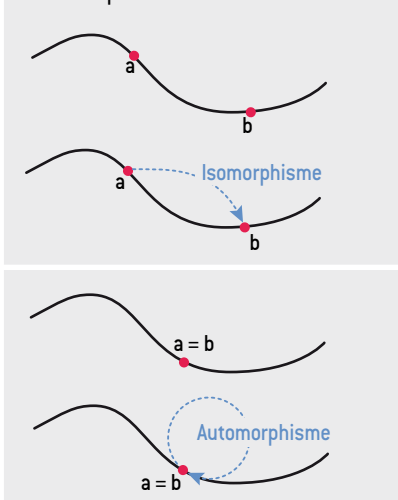
Cependant, en 1958, pris par le considérable travail de refondation de la géométrie algébrique qu'il a entrepris, Grothendieck ne développe pas tout de suite ses idées sur la localisation étale. Tout est dans sa tête, mais il n'y revient que quelques années plus tard, en 1963, avec le démarrage du séminaire de géométrie algébrique du Bois Marie n° 4 (SGA4) à l'Institut des hautes études scientifiques (IHES), à Bures-sur-Yvette, consacré... à sa nouvelle géométrie. Grothendieck donne alors un cadre mathématique formel à l'idée de localisation étale. Les deux principaux outils qu'il utilise pour cela sont le langage des catégories et la théorie des faisceaux.

La notion de catégorie a été introduite en 1945 par les Américains Samuel Eilenberg et Saunders Mac Lane. Elle formalise la notion de classe d'objets, c'est-à-dire d'objets de même nature, et de relations entre ces objets. Une catégorie est d'abord un graphe orienté – des objets et des flèches entre ces objets, qu'on appelle morphismes. Mais on a en plus une composition des

Dans les espaces topologiques



Dans les topos



LES TOPOS FONT DISPARAÎTRE LES CAS PARTICULIERS. Par exemple, pour identifier deux points a et b d'un segment dans le cadre classique des espaces topologiques, on fait une boucle avec le segment pour faire coïncider a et b , sauf dans le cas particulier où a et b sont confondus. Dans ce cas particulier, rien ne se passe. En revanche, dans le cadre des topos, pour identifier deux points sur un segment, on les recolle au moyen d'un isomorphisme, qui relie les points a et b . Et si a et b sont confondus, l'isomorphisme existe toujours, c'est un automorphisme du point ; et on a encore une sorte de « boucle infinitésimale »...

flèches généralisant la composition des applications entre ensembles.

Parmi les catégories les plus usitées, citons la catégorie des ensembles (les flèches sont alors les applications entre ensembles), ou celles des groupes, des anneaux, des espaces topologiques, etc. De même, si E est un espace topologique muni d'un ensemble $\text{Ouv}(E)$ d'ouverts, alors $\text{Ouv}(E)$ est, de manière naturelle, une catégorie (avec pour tout couple d'ouverts U et V tels que V inclus dans U , un seul et unique morphisme de V vers U : l'application inclusion de V dans U).

La « philosophie » des catégories est de mettre l'accent sur les morphismes plutôt que sur les objets eux-mêmes : deux objets isomorphes dans une catégorie sont, du point de vue catégorique, « interchangeables ». Et un objet est connu si l'on connaît ses relations à tous les autres objets. Ce résultat élémentaire, mais fondamental, porte le nom de lemme de Yoneda et peut se traduire par : « Dis-moi qui tu fréquentes et je te dirai qui tu es. »

Bien évidemment, les mathématiciens s'intéressent aussi aux relations entre catégories. Celles-ci sont formalisées sous la forme de foncteurs, des analogues des applications entre ensembles qui permettent de transporter des objets et les relations entre eux d'un « cadre » (une catégorie) dans un autre (une autre catégorie).



RÉCOLTES ET SEMAILLES, où Grothendieck revient notamment sur son œuvre mathématique, n'a pour l'heure été publié qu'au Japon.

Jean-Michel Morel