

# HISTOIRE DE LA CARTOGRAPHIE

## Incidence des découvertes scientifiques

par Marie-Thérèse Besse

---

### **Article reproduit :**

« *L'incidence des découvertes scientifiques sur l'évolution de la cartographie* », par Loïc Cahierre (Bulletin du CFC, n° 61, sept. 1974).

Depuis des temps anciens, la cartographie utilise des techniques variées existant dans différents domaines comme les sciences de la terre, les sciences physiques, les sciences humaines et économiques. L. Cahierre explique dans son article comment les différentes découvertes scientifiques ont permis à la cartographie d'évoluer au fil des époques. Parmi les innovations décisives ayant un impact sur la cartographie, l'auteur évoque tout d'abord la boussole et l'emploi du papier. Puis l'invention de l'imprimerie et le développement du procédé d'impression en taille-douce ont, à la fois, facilité la diffusion et amélioré la qualité des cartes.

Au XVII<sup>e</sup> siècle, le perfectionnement des instruments de mesure et l'emploi systématique des mesures par triangulation ont constitué une étape importante dans l'évolution de la cartographie, en permettant d'effectuer des levés de terrain cohérents et de réaliser des cartes plus précises et détaillées. La carte de Cassini qui couvre l'ensemble du territoire français a été réalisée en s'appuyant sur des triangulations.

Les progrès successifs des techniques d'impression, comme le développement de la lithographie au XIX<sup>e</sup> siècle, ainsi que des procédés de reproduction photographique apportent des possibilités nouvelles. Ils permettent de représenter beaucoup plus d'informations sur la carte et d'en augmenter la cadence d'impression. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, un nouveau moyen d'impression, appelé « offset », fait son apparition. Ce procédé qui est une amélioration de la lithographie, va rapidement s'imposer.

Enfin, l'emploi de la télédétection par satellites dans le levé de terrain ainsi que l'introduction du traitement informatique des données et de l'automatisation des opérations graphiques marquent l'essor d'une ère nouvelle pour la cartographie.

## ÉTUDES GÉNÉRALES

### L'INCIDENCE DES DÉCOUVERTES SCIENTIFIQUES SUR L'ÉVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE

Conférence faite par M. L. CAHIERRE le 9 mars 1974 à l'Association des anciens, élèves et amis de l'École Supérieure de Cartographie Géographique.

La cartographie emprunte ses moyens de travail à des techniques très variées, qui sont des applications de diverses sciences. On conçoit donc facilement que les progrès réalisés dans le domaine de ces sciences peuvent avoir des conséquences, directes ou indirectes, sur son évolution.

La cartographie prend appui sur les sciences de la terre, géographie, géodésie, topographie. Elle bénéficie des possibilités apportées par le développement des sciences physiques : l'optique, qui intervient dans les instruments de terrain, dans les appareils de restitution, dans les installations de reproduction ; l'électricité et l'électronique, qui ont permis de mettre au point des méthodes nouvelles ; l'informatique, qui donne à la cartographie thématique des possibilités insoupçonnées avant son apparition ; la mécanique, ne serait-ce que dans le domaine de l'imprimerie. La chimie, qui connaît un développement spectaculaire, a pris une importance considérable dans les techniques de reproduction. N'oublions pas les sciences humaines et économiques et notamment la statistique, qui donne de plus en plus des bases solides à certains travaux de cartographie thématique.

Je n'ai pas la prétention de dresser une liste exhaustive, et je m'abstiens systématiquement de citer certaines sciences qui, bien qu'elles apportent des éléments à la cartographie, ne semblent pas avoir une influence sur son évolution.

Pour étudier l'incidence sur l'évolution de la cartographie des progrès réalisés dans les sciences que nous venons de passer rapidement en revue, une méthode aurait consisté à considérer ces sciences une par une. Cela n'aurait pas été très pratique, car il aurait fallu faire des allers et retours dans le temps et parcourir plusieurs fois la période des quelques siècles qui nous intéressent. Il paraît plus avantageux de ne faire qu'un seul parcours, en suivant à peu près l'ordre chronologique. Il ne faut pas en déduire que je pourrais avoir l'intention de retracer l'historique de la cartographie. Je veux seulement marquer des étapes, en essayant de montrer comment elles sont reliées chacune à une découverte scientifique.

Sans remonter trop loin dans le temps, je pense que la première découverte scientifique qu'on peut retenir en raison de son incidence sur la cartographie est celle de la boussole. Il s'agit plutôt, d'ailleurs, de l'introduction de la boussole dans les pays d'occident, qui fut consécutive aux croisades. Sur certaines cartes de navigation établies au Moyen-Age, les côtes de la Méditerranée occidentale ont été mises en place au moyen des caps suivis par les navires. Comme ces caps étaient déterminés à la boussole, ils suivaient des loxodromies, qui se traduisent par des droites sur ces cartes. L'ingénieur en chef géographe Albert CLOS-ARCEDEC a fait sur cette question une étude pleine d'intérêt, dans laquelle il constate que ces cartes sont pratiquement établies en projection de Mercator, plusieurs siècles avant Mercator et avant la découverte des systèmes de projection.

Une deuxième découverte est celle du papier. Il s'agit encore là de l'introduction d'une technique orientale dans les pays d'occident à l'époque des croisades. Trois guerriers originaires d'Auvergne qui avaient accompagné Saint Louis à la septième croisade, faits prisonniers par les infidèles, s'initiaient pendant leur captivité aux techniques de fabrication du papier. A leur retour en France ils montèrent un premier moulin à papier dans leur région d'origine, où, soit dit en passant, l'industrie papetière s'est considérablement développée par la suite.

Nous en sommes encore au stade des cartes dessinées à la main, sans aucun canevas géographique. La production cartographique la plus célèbre de cette époque est sans doute la Table de Peutinger, qui fut la reproduction en cinq exemplaires de l'itinéraire d'Antonin, carte romaine du deuxième siècle.

L'étape suivante est marquée par l'invention de l'imprimerie, qu'on attribue communément à Gutenberg, ce qui n'est pas tout à fait exact. Gutenberg a découvert la manière de fondre des caractères métalliques mobiles et la façon de s'en servir pour reporter un texte sur une feuille de papier. Il est donc plus correct de dire qu'il a inventé la typographie, car il est probable qu'on savait, à son époque, reporter des images gravées en relief à la main. Quoi qu'il en soit, c'est à partir des travaux de Gutenberg que l'imprimerie a commencé à prendre de l'extension et c'est au cours des décennies suivantes qu'on a imprimé des cartes en se servant de planches de bois gravées en relief. La plus célèbre, pour nous Français, est sans doute la carte de France d'Oronce Finé, imprimée en quatre quarts au moyen de quatre planches de bois gravé, et dont plusieurs éditions furent publiées dans la première moitié du seizième siècle. A la même époque, certaines cartes, dont le fond était aussi imprimé au moyen de bois gravé, ont comporté une planche d'écritures composées avec des caractères mobiles, et là l'invention de Gutenberg reprend son importance. On peut citer la carte de la Bohême que Sébastien Münster publia en 1545 dans son édition de Ptolémée, puis à partir de 1550 dans sa Cosmographie.

Entre temps une autre méthode d'impression des images avait été découverte en 1470 par l'orfèvre florentin Tommaso Finiguerra. A cette époque la fabrication des nielles était une spécialité des orfèvres florentins, qui gravaient en creux une plaque de métal et bourraient les tailles d'une sorte d'émail noir. Un jour Finiguerra appuya une feuille de papier contre le nielle qu'il fabriquait, peut-être tout simplement pour essuyer le noir qui risquait de déborder des tailles, et il fut tout étonné de constater que l'image s'était décalquée sur la feuille. Le principe de l'impression au moyen d'une planche gravée en creux était ainsi découvert. Le procédé a pris le nom d'impression en taille-douce, d'après l'appellation réservée d'abord à l'un des modes de gravure de la plaque de cuivre.

Cette méthode d'impression présentait sur celle du bois gravé un avantage incontestable, celui de permettre d'obtenir des finesses beaucoup plus grandes dans les traits. Elle a donc supplanté celle de l'impression au moyen de planches en relief dans les éditions cartographiques, et pendant près de quatre siècles, la taille-douce a été le mode normal d'impression des cartes géographiques.

Pendant cette période l'évolution de la cartographie ne va donc pas être marquée par des progrès réalisés dans les techniques graphiques ; elle va être liée à des découvertes intervenues dans d'autres domaines des sciences.

En effet, au début du dix-septième siècle, deux découvertes ont eu une importance considérable sur le développement des sciences de la terre. L'une est l'invention des instruments d'optique, faite par Galilée, qui permit d'exécuter des pointés précis et d'améliorer énormément la qualité des travaux effectués à la surface du terrain. L'autre est la découverte de la méthode des triangulations. Inventée par le médecin, géographe et mathématicien Gemma Frisius dans la première moitié du XVI<sup>e</sup> siècle, cette méthode fut utilisée une première fois par l'astronome danois Tycho Brahé pour relier le Danemark à la Suède par dessus le détroit du Sund en faisant une station intermédiaire dans l'île de Veen où il avait son observatoire, et ultérieurement mise au point par le savant hollandais Willebrod Snell van Royen, dit Snellius, pour la détermination des longueurs des arcs de méridien.

Plusieurs applications de cette méthode des triangulations furent faites dans le courant du siècle, notamment par les Pères Riccioli et Grimaldi, en Italie, et par l'abbé Picard, en France. Ce dernier, membre de l'Académie Royale des Sciences, mesura en 1669-1670 un arc de méridien dont les extrémités se trouvaient respectivement à Sourdon, dans la région d'Amiens, et à Malvoisine, dans celle de Melun. Le roi Louis XIV, ayant beaucoup prisé le travail effectué par l'abbé Picard, voulut qu'on mesurât de la même manière tout le méridien qui traverse la France, en prolongeant vers le nord et vers le sud la chaîne de triangles de l'opération primitive. Jean Dominique Cassini, Directeur de l'Observatoire de Paris, entreprit en 1683 la mesure de cette chaîne méridienne, mesure qui fut achevée par son fils Jacques en 1718. Celui-ci mesura ensuite une chaîne dont la direction générale était perpendiculaire à celle de la première, en suivant un parallèle depuis la Bretagne jusqu'à la frontière orientale de la France. Sur ces deux chaînes principales on greffa toute une triangulation qui s'étendit à l'ensemble du territoire. Une carte dressée en 1744

donne le réseau complet de cette triangulation, qui présente un certain nombre de lacunes, dues à l'impossibilité de parcourir alors certaines régions du territoire, notamment dans les montagnes. C'est cette triangulation qui a servi de base aux levés de terrain effectués pour l'exécution de la carte de Cassini. Celle-ci fut entreprise en 1750 par César-François Cassini, dit Cassini de Thury, fils de Jacques. On sait que la carte de Cassini est la première carte topographique qui ait couvert l'ensemble du territoire de la France. Son exécution a été rendue possible par l'établissement d'un réseau géodésique réalisé par la méthode des triangulations. Elle marque une étape importante dans l'histoire de la cartographie française.

L'exemple de la carte de Cassini est sans doute celui qui nous frappe le plus mais, d'une façon plus générale, on peut considérer que l'application de la méthode des triangulations a constitué le début d'une ère nouvelle dans l'évolution de la cartographie, en fournissant aux levés du terrain un canevas cohérent sur lequel ils puissent s'accrocher. Il faut bien remarquer que dans l'antiquité il y avait déjà des arpenteurs qui savaient faire des plans et mesurer des surfaces, mais les vraies cartes topographiques n'ont existé qu'à partir du moment où la géodésie leur a préparé les voies.

L'usage des courbes de niveau pour la représentation du relief s'est introduit dans le cours du dix-huitième siècle, et son invention est assez curieuse. Elle est due au génie militaire, qui était chargé de lever les plans des ouvrages fortifiés, et qui commença par indiquer les cotes du terrain de haut en bas, à partir d'un plan situé au-dessus de l'ouvrage à lever. Ultérieurement on préféra indiquer les cotes de bas en haut à partir d'un plan inférieur. L'emploi des courbes de niveau resta longtemps confiné dans le domaine des plans topographiques, et il ne fut étendu aux cartes que dans le courant du siècle suivant. Jusqu'alors le relief, indiqué d'abord sommairement par des petits dessins de buttes, de collines ou de montagnes, avait été ensuite représenté par des hachures, encore assez grossières à l'époque de la carte de Cassini, puis de plus en plus parlantes et expressives.

Nous pouvons évoquer l'adoption du système métrique par l'Assemblée Constituante en 1791. Ce n'est pas à proprement parler une découverte scientifique, mais c'est une opération scientifique qui a eu des conséquences considérables dans bien des domaines, à commencer par celui des sciences de la terre. Elle a comporté en effet la reprise de la mesure de la méridienne de France, qui a été effectuée par Delambre et Méchain, comme chacun sait, et prolongée hors du territoire français jusqu'aux îles Baléares par Biot et Arago. Cette mesure de la méridienne de France a donné lieu indirectement à l'établissement d'une nouvelle triangulation de l'ensemble du territoire, dite triangulation des ingénieurs-géographes, qui a servi de base aux levés topographiques effectués en vue de la confection de la carte de France au quatre-vingt millièmes, dite carte de l'État-Major parce que les levés furent exécutés par les officiers du corps d'État-Major, le corps des ingénieurs-géographes ayant été supprimé après achèvement de la triangulation.

Le système métrique a rendu d'autres services à la cartographie, notamment en permettant de choisir des échelles compatibles avec la numération décimale. On sait qu'il a été adopté successivement par un très grand nombre de pays, et les Britanniques, chez qui il n'a été officialisé que depuis quelques années, en sont devenus les plus ardents promoteurs dans certain domaine où il n'a pas encore été admis. Il s'agit, bien entendu, de la typographie, qui utilise encore en France un système de mesures instauré par François-Ambroise Didot en 1775 et dans les pays anglo-saxons un système encore plus particulier. Les typographes se sont jusqu'à présent montrés réfractaires à l'introduction du système métrique dans la composition typographique. Cela complique considérablement les choses, car dans toutes les autres branches des industries graphiques on se sert des unités métriques. L'incidence sur la cartographie est faible, mais elle n'est pas complètement négligeable, à cause des écritures des cartes, qui sont composées en caractères typographiques, et des légendes et autres inscriptions qui peuvent être portées dans les marges des feuilles de cartes.

La fin du dix-huitième siècle a été marquée, dans le domaine des techniques graphiques, par deux inventions importantes. En 1796 le tchèque Aloys Senefelder a découvert la lithographie. En 1798 le français Louis-Nicolas Robert a construit la première machine à fabriquer le papier en continu. Nous n'insisterons pas longuement sur cette dernière invention. Il suffit de signaler, semble-t-il, qu'elle a donné à l'industrie papetière un développement considérable, dont a bénéficié la cartographie.

L'invention de la lithographie a eu au contraire des conséquences beaucoup plus directes sur l'évolution de la cartographie, bien qu'elles ne se soient pas produites immédiatement. Comme

la découverte de l'impression en taille-douce, elle a été due au hasard, mais l'inventeur a su exploiter scientifiquement le phénomène fortuit qu'il avait constaté.

Aloys Senefelder, qui était né à Prague quelque vingt-quatre ans plus tôt, travaillait alors à Munich. Pour occuper ses loisirs il écrivait, et il désira publier ses œuvres, mais, comme les imprimeurs lui demandaient des sommes qu'il jugeait incompatibles avec ses ressources, il chercha à se débrouiller par lui-même. Il composa donc des formes avec des caractères d'imprimerie ordinaires et en prit des empreintes dans la cire mais il trouva que cette matière était trop cassante et chercha une autre méthode, en utilisant le procédé de gravure à l'eau-forte. La question financière se posa de nouveau, car les plaques de cuivre coûtaient cher, et Senefelder tenta de les remplacer par des pierres plates parfaitement polies qu'il avait remarquées sur les bords de l'Isar. Il y gravait son texte, puis il bourrait les tailles avec une encre noire qu'il avait fabriquée.

Ayant un jour à prendre rapidement quelques notes, et n'ayant pas de papier sous la main, il écrivit à l'encre noire sur une pierre. Par curiosité, il passa de l'acide sur la pierre pour voir quel serait l'effet de ce traitement sur le tracé. Celui-ci ne fut pas altéré et Senefelder, appliquant par la suite une feuille de papier contre la pierre, obtint un décalque qui constituait une véritable impression du texte. Ce fut là le point de départ de l'invention de la lithographie, que Senefelder sut développer scientifiquement et perfectionner par la suite après en avoir mis au point l'exploitation.

Ce n'est peut-être pas là une découverte scientifique au sens propre des termes, mais c'est une invention technique qui est fondée sur des phénomènes scientifiques : phénomènes physiques, qui découlent de l'application de la théorie de la tension superficielle des liquides, phénomènes chimiques, relatifs à l'action des acides sur le carbonate de calcium et sur les métaux, car Senefelder trouva ultérieurement le moyen de remplacer les pierres par des plaques de zinc, beaucoup plus faciles à manier.

L'invention de la lithographie devait avoir des conséquences très importantes sur le développement de la cartographie, car elle a apporté à celle-ci des possibilités nouvelles, en permettant d'augmenter la cadence de l'impression des cartes, d'utiliser des papiers plus pratiques et surtout d'établir des cartes en plusieurs couleurs, avec éventuellement des teintes plates et des teintes dégradées.

Reprenons ces trois points.

Les premières presses lithographiques étaient manœuvrées à la main, comme les presses à taille-douce, néanmoins le service en était plus rapide, ce qui constituait déjà un progrès. Mais, surtout, le dix-neuvième siècle fut le siècle de la mécanisation, et dès avant 1820, les allemands Koenig et Bauer avaient construit les premières presses typographiques mécaniques. Elles ne furent pas utilisées en cartographie mais lorsqu'on voulut construire des presses lithographiques mécaniques pour imprimer plus vite qu'à la presse à bras, on s'inspira fortement de la structure des presses typographiques pour définir l'organisation des machines plates lithographiques, qui permirent d'imprimer des cartes à la cadence de 400 à 500 exemplaires à l'heure. Il faut remarquer toutefois que ces machines n'ont vu le jour qu'à une époque assez tardive dans le siècle.

Pour imprimer en taille-douce, il faut employer un papier très souple, susceptible d'être énergiquement comprimé pour puiser l'encre dans les tailles. C'est en général un papier à longues fibres, grenu et assez épais, et par conséquent assez raide, ce qui est un inconvénient pour certains usages des cartes. L'impression en lithographie s'accommode au contraire de papiers d'emploi plus pratique, parce qu'ils peuvent être plus minces et supporter plus facilement le pliage. Une condition impérative est toutefois la nécessité d'avoir un bon lissé. De tels papiers étaient fabriqués couramment lorsque les machines à papier en continu, dont nous avons salué la naissance, se sont développées et perfectionnées.

Afin d'augmenter la souplesse du papier en vue de son impression en taille-douce, on l'humidifie légèrement, de sorte que, lorsqu'il sèche après l'impression, l'image imprimée ne conserve pas ses dimensions. Et comme ces modifications de dimensions ne sont pas régulières, l'impression en taille-douce ne se prête pas au tirage en couleurs. Un essai fut néanmoins tenté, vers la fin du Second Empire, pour transformer la carte de l'État-Major en une carte polychrome. Le Colonel Levret, du Dépôt de la Guerre, fit graver la feuille de Montpellier au 80 000<sup>e</sup> sur cinq plaques de cuivre, portant respectivement l'hydrographie, les hachures du relief, les lieux habités, les vignes, les bois et prairies. Les épreuves obtenues furent très mauvaises et l'essai ne fut pas poursuivi.

Des essais d'impression polychrome tentés en lithographie sur d'autres cartes avaient au contraire donné des résultats satisfaisants. Par exemple, le Dépôt de la Guerre avait publié, de

1861 à 1864, une carte du Liban au 200 000<sup>e</sup> en trois couleurs établie par le procédé lithographique de la gravure sur pierre. Peu de temps après une carte du Mexique destinée au corps expéditionnaire fut établie en plusieurs couleurs.

En même temps qu'elle permettait de réaliser des impressions polychromes et par conséquent de diversifier la représentation des informations localisées sur les cartes, la lithographie donnait la possibilité d'utiliser autre chose que des traits. On a donc employé des teintes plates, pour certaines étendues d'eau, par exemple, et pour la représentation du relief par des teintes hypsométriques, tandis que, dans la gravure sur cuivre, on ne pouvait que se servir de traits plus ou moins serrés. On a aussi utilisé des teintes dégradées pour représenter le relief par un estompage figurant les ombres produites sur le terrain par un éclairage fictif venant d'une direction donnée. Ces teintes dégradées étaient obtenues par le procédé du crayon lithographique utilisé avec une pierre grainée.

Les premières cartes imprimées en lithographie sont peut-être celles de l'atlas de Lemerrier, dont on trouve des feuilles en vente chez les bouquinistes des quais. Pendant des décennies l'emploi de la lithographie pour l'impression des cartes ne se manifesta guère que par des essais sporadiques, alors que l'établissement de la carte de l'État-Major était poursuivi en gravure sur cuivre. Ce n'est qu'après avoir achevé cette carte, et après avoir pris conscience de ses imperfections, qu'on se décida, en 1879, à mettre en chantier une nouvelle carte topographique de la France, en couleurs, et à peu près à la même époque on entreprit aussi l'établissement d'une carte de France au 200 000<sup>e</sup> et une carte de l'Algérie au 50 000<sup>e</sup>. Toutes ces cartes étaient rédigées en gravure sur des plaques de zinc, le procédé de la gravure pour la formation de l'image lithographique permettant d'obtenir dans les traits des finesses plus grandes que celui du tracé direct en surface au moyen d'un instrument de dessin. D'autre part on avait abandonné la pierre au profit du zinc, dont les plaques étaient beaucoup plus maniables que les pierres lourdes et encombrantes. C'est ainsi que les estompages étaient dessinés au crayon lithographique sur des plaques de zinc, grainées moins finement que celles qu'on destinait aux planches de trait.

Entre temps Joseph-Nicéphore Niepce avait inventé la photographie. En 1822 il réussit à fixer une image stable sur une couche de bitume de Judée. Le procédé se développa rapidement, grâce aux travaux de nombreux autres chercheurs, et les applications en furent très diverses. Plusieurs d'entre elles ont eu une très grande importance dans l'évolution de la cartographie. Je citerai la photographie de reproduction, la photolithographie, la photogrammétrie, la photocomposition, la photointerprétation. Je parlerai maintenant des premières, renvoyant les dernières à plus tard, pour ne pas trop bousculer l'ordre chronologique, auquel j'ai déjà dû faire quelques entorses, car il s'écoule toujours un certain nombre d'années de développement entre l'apparition d'une invention et la mise en pratique de ses applications dans l'usage courant.

La photographie de reproduction et la photolithographie sont liées, la première étant un intermédiaire qui permet de réaliser sur un support transparent l'image d'un modèle original afin de pouvoir la reporter sur une planche d'impression. L'adoption de ces procédés permit de remplacer la gravure directe des planches des cartes par l'établissement de modèles dessinés sur des feuilles de papier, ce qui constituait un progrès incontestable pour la facilité du travail. Cette nouvelle méthode donnait en outre la possibilité de dessiner le modèle à une échelle plus grande que l'échelle définitive de la carte, ce qui faisait disparaître une bonne partie des imperfections du dessin grâce à la réduction photographique destinée à obtenir cette dernière échelle.

Le procédé photographique adopté fut celui du collodion humide, qui était le plus perfectionné à l'époque où l'on songea à appliquer la photographie à la cartographie. Il avait le gros avantage d'assurer une parfaite conservation des dimensions, puisque le collodion était coulé sur une glace épaisse, en même temps qu'il donnait aux traits une grande netteté et réalisait un bon contraste entre les parties transparentes et les parties opaques des clichés. Mais il avait de gros inconvénients : la nécessité de préparer les plaques au moment de s'en servir, la lenteur des opérations, la toxicité des produits employés. Il a néanmoins subsisté jusqu'à une époque assez récente.

La photolithographie a pour objet de réaliser une planche d'impression lithographique en reportant sur une pierre l'image portée par un cliché photographique. On étend sur la pierre une couche sensible à la lumière, à savoir une couche d'un colloïde bichromaté, et on soumet cette couche à l'action des rayons lumineux après avoir interposé le cliché qui porte l'image à reporter. Les parties opaques du cliché arrêtent les rayons, les parties transparentes les laissent passer et provoquent dans la couche une action chimique qui entraîne une modification physique de cette couche. Il est possible ensuite de séparer les deux régions ainsi déterminées à la surface de la pierre, et de répandre de l'encre sur celle qui constitue l'image imprimante.

Le procédé fut utilisé pour établir une carte des environs de Paris au 20 000<sup>e</sup>, en six couleurs et en trente-six feuilles, qui fut présentée en un panneau à l'Exposition universelle de 1889. Mais on abandonna rapidement la pierre, et on appliqua le procédé de la photolithographie à des plaques de zinc. Le temps gagné par rapport à la méthode d'établissement des planches-mères en gravure fut considérable. Il fut possible aussi de remplacer le dessin des estompages au crayon lithographique par la photographie tramée d'un lavis.

Le terme de photolithographie fut alors jugé impropre, puisqu'il ne s'agissait plus d'une pierre. On essaya photozincographie, photométagraphie et d'autres termes encore, qui furent à l'usage trouvés bien compliqués. Actuellement on dit la copie sur métal, et encore plus souvent et plus simplement la copie.

Le procédé de copie fut adopté pour l'établissement de la nouvelle carte de France au 50 000<sup>e</sup>, décidé en 1898 pour remplacer celui de la carte topographique de la France entrepris en 1881, qui avait été abandonné quelques années plus tard à cause de la lenteur et du prix des travaux. Il se généralisa peu à peu pour toutes les autres cartes, en France et dans les autres pays. L'application de la photographie aux techniques d'établissement des cartes a donc marqué une étape très importante dans l'évolution de la cartographie, en donnant à celle-ci un vigoureux essor.

Puisque l'image photographique est une perspective, on peut s'en servir pour faire des mesures. Le colonel Aimé Laussedat, officier du génie né en 1819, eut le premier l'idée d'utiliser les clichés photographiques pour l'exécution des levés topographiques, en pratiquant des mesures sur les images du terrain portées par ces clichés. Ce fut l'origine d'une technique qu'on appela d'abord en France métrophotographie, terme qui ne résista pas devant celui de photogrammétrie, d'origine allemande, qui fut proposé par la suite. La photogrammétrie mit d'abord en œuvre des clichés réalisés dans des appareils photographiques posés sur un trépied à la surface du terrain, et quelques levés furent effectués par cette méthode, mais elle ne trouva son plein développement que lorsqu'elle put exploiter des photographies aériennes. Et ici intervient l'apparition de l'aviation.

On n'avait d'ailleurs pas attendu les premiers avions pour faire des photographies aériennes. En 1858 l'ingénieur Félix Tournachon, plus connu sous le pseudonyme de Nadar, réussit, après plusieurs tentatives infructueuses, à prendre de la nacelle d'un ballon une vue de l'avenue du Bois de Boulogne. On opéra aussi avec des cerfs-volants, vers 1903-1904. Mais les images ainsi obtenues étaient destinées à la simple observation plutôt qu'à l'établissement des cartes. Le développement de la photographie aérienne, qui fut une conséquence de l'apparition de l'aviation, fut favorisé par la guerre de 1914-1918. En effet les photographies aériennes furent utilisées pour repérer les positions ennemies, et les reporter en surcharge sur les cartes, au moyen de méthodes géométriques simples qui s'appuyaient sur les points identifiés à la fois sur la carte et sur la photographie. En partant de ces points, on mettait facilement en place les détails repérés sur la photographie.

Après la guerre, on voulut généraliser la méthode et dresser des cartes nouvelles, et non plus simplement compléter des cartes existantes, en utilisant des photographies aériennes. Après avoir essayé des méthodes de redressement des clichés, on en est arrivé aux procédés de restitution stéréoscopique, et actuellement la photogrammétrie a supplanté les levés terrestres pour l'établissement des cartes topographiques.

Quelques années après le début du vingtième siècle, à peu près à l'époque où volèrent les premiers avions, on vit apparaître, dans le domaine des techniques graphiques, un nouveau procédé d'impression, l'offset, qu'on peut considérer comme une forme moderne de la lithographie. Le principe en avait été découvert antérieurement, par deux ingénieurs des Forges d'Hennebont, Trottier et Missier, qui fortuitement, en 1878, réalisèrent une impression au moyen d'un décalque sur une feuille de caoutchouc. Ils prirent un brevet pour l'impression sur métal par cette méthode et, trois ans plus tard, un autre brevet pour l'impression sur papier, mais il ne semble pas qu'ils les aient exploités activement. Il fallut attendre plus de vingt années pour voir réapparaître l'offset qui commença à entrer en application sans qu'on sache exactement où et quand le procédé avait été lancé. On vit d'abord des machines d'essai, en France, en Angleterre et en Amérique, puis les constructeurs estimèrent que le procédé était suffisamment sûr pour qu'ils puissent proposer aux imprimeurs des presses destinées à le mettre en application industrielle.

En France le premier modèle, construit par la maison Voirin, qui fabriquait des machines plates lithographiques, fut mis sur le marché en 1910. Une première presse offset fut installée dans l'imprimerie du Service Géographique de l'Armée en 1912, une deuxième pendant la guerre 1914-1918.

On sait que l'offset est un procédé d'impression lithographique dans lequel l'image est trans-

férée de la planche d'impression au papier au moyen d'un décalque intermédiaire réalisé sur une feuille de caoutchouc. La planche d'impression est une plaque métallique enroulée sur un cylindre. La feuille de caoutchouc, appelée blanchet, est enroulée sur un deuxième cylindre, tangent au premier. Elle prend le décalque de l'image imprimante lorsqu'elle roule contre la plaque et elle le reporte sur la feuille de papier qui s'enroule sur un troisième cylindre et vient à son contact immédiatement après la prise du décalque.

Ce procédé nouveau présentait de gros avantages sur l'impression en lithographie ancienne. Il évitait le contact direct entre la plaque et le papier, ce qui est favorable à la bonne tenue de l'image sur la plaque, puisque le risque d'abrasion par les particules minérales contenues dans le papier est à peu près éliminé. Il permettait d'employer un papier ayant un lissé quelconque, grâce à la souplesse du blanchet qui se moule sur les irrégularités du papier, assurant ainsi un bon contact sur l'ensemble de la feuille et un excellent transfert de l'encre. Sur la plaque offset l'image est à l'endroit, puisque le décalque sur le blanchet provoque un renversement, tandis qu'en lithographie ancienne l'image était à l'envers, puisqu'il y avait contact direct entre la plaque et le papier. Enfin, et c'est sans doute là l'avantage le plus marqué, l'offset permettait d'organiser les presses de telle façon que tous les mouvements qui servent à l'impression soient des rotations uniformes, et non pas des translations oscillatoires comme dans la machine plate lithographique, ce qui donnait des possibilités considérables d'augmentation de la vitesse d'impression.

Par ailleurs l'offset se prêtait aussi bien que la lithographie et la taille-douce à l'exécution des corrections de mise à jour sur les plaques.

Pour toutes ces raisons l'offset s'est rapidement généralisé comme procédé d'impression des cartes géographiques. Il s'est d'autant plus développé après la guerre de 1939-1945 que les progrès de la chimie ont permis de mettre au point des substances et des méthodes qui ont donné à la fois plus de facilité et plus de sécurité dans les opérations de photographie et de copie nécessaires à l'établissement des plaques.

Parmi tous les progrès réalisés par la chimie à cette époque, ceux qui ont eu les conséquences les plus directes sur l'évolution de la cartographie sont sans doute ceux qui concernent les substances synthétiques, autrement dit les plastiques, qui ont envahi tous les domaines. La mise au point des plastiques en feuilles, notamment, a donné aux cartographes la possibilité de modifier certaines de leurs méthodes de travail dans l'établissement des modèles des cartes et dans leur reproduction. C'est l'apparition de feuilles de plastiques transparents ayant une stabilité dimensionnelle suffisante qui a permis de profiter des avantages que les plastiques présentaient par ailleurs.

L'utilisation de supports indéformables dans la fabrication des films photographiques a permis d'abandonner le vieux procédé du collodion humide et d'adopter les pellicules au gélatino-bromure pour les travaux photographiques qui interviennent dans l'établissement des cartes. On a trouvé là des avantages indéniables dans les modes opératoires, mais en outre les émulsions au gélatino-bromure ont donné la possibilité de faire des sélections de couleurs, impraticables avec le collodion. Les émulsions au gélatino-bromure avaient été considérablement améliorées, de sorte qu'elles rivalisaient en finesse et en contraste avec le procédé ancien, auquel ces qualités avaient jusqu'alors conféré une certaine supériorité. Une amélioration appréciée dans les films photographiques a été la mise au point des films pelliculables, qui facilitent les opérations nécessitées dans certains cas par le sens des images.

Une autre application de la mise au point des supports en plastique a été le procédé du tracé sur couche pour l'établissement des maquettes des cartes. Introduite en Europe par l'armée américaine, cette méthode a d'abord été essayée avec des couches coulées sur des supports en glace, mais l'apparition des feuilles de plastiques indéformables a permis de lui donner une très grande extension, et l'on trouve dans le commerce des feuilles toutes prêtes à être gravées. Une feuille sur laquelle le tracé a été effectué joue le rôle d'un cliché négatif. Certaines couches permettent de pratiquer l'inversion, et l'on obtient alors une image positive. L'emploi des couches à tracer permet donc d'éviter le dessin des modèles sur un papier et les opérations photographiques destinées à les reproduire.

Certaines couches sont pelliculables, ce qui est très commode lorsqu'on veut établir des planches de teintes. C'est là un très gros avantage dans la cartographie thématique, où l'on a souvent l'occasion de localiser des phénomènes sur des surfaces.

Une autre possibilité apportée par les plastiques est le remplacement des planches-mères métalliques par des planches-mères en plastique transparent, qui a été réalisable lorsqu'on a su

procéder à la copie sur plastique par des modes opératoires dérivés de ceux de la copie sur métal. Avec les planches-mères métalliques, on établit les planches de tirage par report creux à la presse à contre-épreuve, tandis qu'avec les planches-mères en plastique les opérations sont simplifiées puisqu'elles se bornent à la copie. En outre le stockage est énormément facilité, car le jeu de planches-mères en plastique d'une feuille de carte tient dans une pochette qu'on met dans un tiroir, tandis que le jeu correspondant des planches-mères en zinc demande un casier vertical entier, et pèse beaucoup plus lourd.

Il arrive parfois, pour des commodités de tirage, qu'on reporte sur une même planche d'impression les images de deux ou plusieurs planches-mères. C'est ce qu'on appelle faire un report combiné. Une solution pratique a été apportée à ce problème par l'emploi de feuilles de plastique mince, sur chacune desquelles on fait un par un les différents décalques et qu'on superpose ensuite en mettant soigneusement les images en repérage. Des méthodes modernes de repérage par tétonnage permettent de faire cette opération avec une précision très grande. On fait ensuite la copie en procédant à l'insolation à travers cet assemblage complexe.

Citons encore une autre application cartographique des plastiques en feuilles, mais cette fois il ne s'agit plus d'un support transparent, mais d'une feuille opaque. C'est depuis qu'on utilise à cet effet des feuilles de plastique qu'on peut fabriquer des cartes en relief d'une façon techniquement correcte et en même temps rentable. Les feuilles de plastique, imprimées à l'avance, sont gaufrées par dépression dans une matrice, de telle manière que les lignes de crêtes et de thalwegs se trouvent rigoureusement en place, tandis que les flancs sont étirés en conséquence.

Si l'emploi des plastiques en feuilles a donc pris une extension considérable en cartographie, il faut noter que d'autres substances synthétiques se sont introduites dans certains modes opératoires appliqués dans l'établissement des cartes. Il s'agit notamment des alcools polyvinyliques, qui forment la base des colles utilisées actuellement pour les opérations de copie, car elles donnent une garantie de réussite beaucoup plus grande que les colloïdes organiques employés précédemment. On peut citer aussi les photopolymères, qui commencent à être utilisées pour la fabrication de plaques offset présensibilisées. Ce sont des matières plastiques qui, sous l'action des rayons lumineux, subissent une polymérisation qui modifie leurs propriétés physiques, en les rendant insolubles. L'opération de copie est alors simplifiée.

Ce sont aussi des photopolymères qu'on utilise dans plusieurs méthodes d'établissement d'épreuves en couleurs repérées destinées à contrôler les sélections. La cartographie commence à s'intéresser à ces méthodes, qui peuvent permettre de remplacer la confection des épreuves d'essai à la presse à contre-épreuve par une opération beaucoup plus rapide.

Il est un autre secteur de la chimie dans lequel des progrès importants réalisés au cours de la même période de l'après-guerre ont intéressé eux aussi les techniques cartographiques. C'est celui des émulsions photographiques. J'ai déjà eu l'occasion de citer les améliorations apportées aux émulsions au gélatino-bromure pour la photographie en noir et blanc, qui ont permis d'abandonner le procédé du collodion humide. Un autre progrès remarquable a été la mise au point des couches sensibles pour la photographie en couleurs. Les premiers essais de photographie en couleurs datent de plus de cent ans avec les procédés proposés par Louis Ducos du Hauron et par Charles Cros. D'autres tentatives ont été faites par la suite avec le procédé Lippmann et avec les plaques autochromes Lumière, qui apportaient des solutions excellentes en théorie, mais difficiles à mettre en œuvre en pratique. Les procédés modernes, fondés sur des méthodes de synthèse soustractive, ont été rendus possibles par les progrès réalisés dans la chimie des substances colorantes, et ils ont connu une extension très rapide. Ils sont utilisés en cartographie dans la photo-interprétation, qui est devenue l'une des méthodes fructueuses de travail de certaines branches de la cartographie thématique.

Avant d'utiliser les photographies en couleurs, on cherchait à tirer des informations de la comparaison des photographies aériennes prises respectivement avec des émulsions panchromatiques ordinaires et avec des émulsions sensibles aux radiations infra-rouges. Le fait de trouver sur les photographies les couleurs réelles du sol et de ce qui se trouve à sa surface a considérablement facilité la photo-interprétation, qui a encore découvert des possibilités nouvelles dans l'emploi des émulsions fausses couleurs. Celles-ci, qu'on obtient grâce à des colorations spéciales des couches sensibles, de façon notamment à utiliser une couche sensible à l'infra-rouge, modifient les teintes de certaines parties des images, permettant ainsi de faire des distinctions plus poussées. La méthode des équidensités rend aussi des services en photo-interprétation.

Parmi les applications de la photographie que j'ai citées tout à l'heure, j'ai mentionné la photocomposition. Elle constitue un excellent procédé pour la composition des écritures des cartes,

puisqu'elle fournit les mots sous une forme très facile à exploiter, car ils sont composés directement sur un film ou sur une feuille de papier-bromure.

Les premières photocomposeuses ont été mises au point dans les années qui ont suivi la guerre de 1939-1945. Elles étaient dérivées des machines de composition mécanique, dans lesquelles on avait remplacé le système de fonte des caractères par un dispositif photographique. Dans les machines de la deuxième génération, on a au contraire rompu avec toute tradition. Les unes comme les autres sont utilisées pratiquement pour la composition des écritures des cartes. On emploie aussi des machines plus simples, appelées phototitreuses, qui ne résolvent pas le problème de la justification des lignes. Mais ce problème ne se pose pas dans la composition des écritures cartographiques.

Une troisième génération de photocomposeuses est apparue plus récemment, mais je ne pense pas qu'on s'en serve en cartographie, car il s'agit là de machines très puissantes et à grand rendement, destinées à composer des quantités considérables de texte. Dans ces machines, les caractères, stockés dans des mémoires sous forme codée, sont projetés sur l'image d'un écran cathodique et photographiés par un appareil dont l'objectif est placé en face de l'écran.

Et ceci m'amène tout naturellement à parler de l'électronique, dont on connaît les développements dans les dernières décennies. L'application la plus spectaculaire de l'électronique à la cartographie est bien son automatiser. Ici nous sommes encore en période d'essais, bien que des résultats concrets aient déjà été obtenus.

On peut emmagasiner des données cartographiques dans la mémoire d'un ordinateur, puis, après traitement éventuel, les en extraire pour obtenir l'information cartographique sous la forme désirée au moyen d'un terminal approprié. Ce terminal peut par exemple être une table traçante si l'on veut réaliser un plan ou une carte d'un aspect classique. Il peut être une imprimante si l'on veut traduire des renseignements statistiques sous la forme d'une carte sans attacher de l'importance à une apparence traditionnelle. Il peut être encore une console de visualisation.

Des possibilités considérables sont ainsi ouvertes à la cartographie thématique. Celle-ci tire fréquemment ses informations des statistiques établies sur les sujets qu'elle étudie. L'ordinateur lui fournit le moyen de traiter rapidement ces informations et d'en déduire les résultats dont elle a besoin, en les présentant même directement sous forme de cartes. On pourrait dire que la cartographie thématique entre dans une ère nouvelle.

Une autre application de l'électronique, qui vient tout juste de s'introduire dans la cartographie, bien qu'on y ait songé depuis longtemps, est l'emploi des appareils électroniques de sélection, qu'on appelle les scanners. On sait que ces appareils effectuent automatiquement la sélection trichrome des clichés en couleurs. A l'assemblée générale de l'Association Cartographique Internationale qui s'est tenue en août 1972 au Canada, il a été fait état d'essais de sélection pratiqués en Amérique sur des maquettes de cartes polychromes. La méthode est certainement appelée à se développer, apportant ainsi une contribution à l'automatisation de la cartographie.

L'intérêt des informations fournies par les photographies prises au cours des survols du terrain a conduit à étendre considérablement ce domaine et à développer un ensemble de méthodes qui constituent la télédétection. La photo-interprétation en est une partie, mais dans l'ensemble de la télédétection les chambres de prise de vues ne sont plus les seuls « capteurs », et les avions ne sont plus les seuls « vecteurs ».

En effet les radiations du spectre visible ne sont pas les seules que l'on puisse exploiter, et des procédés ont été mis au point pour utiliser les rayonnements réfléchis par le sol dans d'autres longueurs d'onde. L'un d'eux est la thermographie, dans laquelle un appareil explore le terrain par balayage et enregistre sur une bande magnétique les différences de température entre les points du sol. L'enregistrement magnétique est ensuite transformé en image photographique par un système traducteur d'image.

D'autres procédés utilisent un dispositif multispectral, qui permet d'enregistrer simultanément les rayonnements émis par le sol dans différentes parties du spectre correspondant aux longueurs d'onde qui ne sont pas absorbées par les gaz de l'atmosphère. La comparaison de ces divers enregistrements donne des renseignements intéressants.

La télédétection emploie aussi des radars, qui émettent des radiations et enregistrent leur retour après réflexion sur le sol. Leur avantage réside dans l'utilisation d'ondes centimétriques, qui passent plus facilement à travers les nuages. Le radar latéral permet d'explorer une surface plus étendue. Il donne des vues perspectives qu'on peut redresser, ce qui permet de localiser les phénomènes et conduit directement aux applications cartographiques.

Les capteurs employés dans ces différents procédés de télédétection peuvent être placés à bord des avions. Ils peuvent aussi être emportés par des satellites artificiels, qui, du fait des altitudes auxquelles ils s'élèvent, conviennent particulièrement bien aux études générales.

Mais ce n'est pas là le seul intérêt cartographique des satellites. Ceux-ci ont permis de faire des progrès inattendus dans les sciences de la terre, et en particulier dans la détermination de la forme du globe terrestre et dans la connaissance du potentiel de la pesanteur. Les observations faites sur les satellites ont permis très rapidement de résoudre un problème auquel les géodésiens s'attaquaient depuis des siècles, à savoir la détermination de l'aplatissement de l'ellipsoïde terrestre. Cette détermination a une très grande importance en cartographie, car toutes les cartes sont établies dans un système de projection calculé sur un ellipsoïde donné. Le changement d'ellipsoïde dans un système cartographique constitue d'ailleurs un immense travail, et il est à croire que malgré la connaissance précise que l'on possède maintenant de l'aplatissement, les cartes actuelles resteront accrochées aux ellipsoïdes qui ont été adoptés pour leur établissement, et qui avaient été déterminés tant bien que mal au cours du siècle dernier.

Pour conclure, je dirai que si le titre de la conférence avait été « l'évolution de la cartographie », j'aurais tenté de développer quelques considérations prospectives. Mais j'ai voulu surtout marquer les conséquences des découvertes scientifiques, et je ne peux pas préjuger de ce que la recherche nous réserve pour les années à venir. Il est à noter toutefois que certaines découvertes récentes n'ont pas encore été complètement exploitées en cartographie, et qu'on peut prévoir des développements futurs dans certaines techniques où les applications cartographiques ne sont encore qu'au stade des essais.

On peut penser par exemple que l'emploi des scanners deviendra courant dans l'établissement des cartes polychromes, que la télédétection ouvre des perspectives nouvelles dans certaines branches de la cartographie thématique, que l'automatisation de la cartographie se généralisera dans bien des domaines.

J'ai pris l'expression « découvertes scientifiques » dans un sens très large, car j'ai parlé aussi des progrès techniques. Mais il faut bien voir que ceux-ci résultent toujours, plus ou moins directement, de l'application au secteur particulier d'un métier des découvertes faites dans le domaine général des sciences.