



Henri Desbois

Les mesures du territoire
Aspects techniques, politiques et culturels des mutations de la carte topographique

Presses de l'enssib

Chapitre 1. L'invention de la précision : cartographie et technique de l'astrolabe au GPS

DOI : 10.4000/books.pressesenssib.4253
Éditeur : Presses de l'enssib
Lieu d'édition : Villeurbanne
Année d'édition : 2015
Date de mise en ligne : 14 janvier 2019
Collection : Papiers
EAN électronique : 9782375460702



<http://books.openedition.org>

Édition imprimée

Date de publication : 1 janvier 2015

Référence électronique

DESBOIS, Henri. *Chapitre 1. L'invention de la précision : cartographie et technique de l'astrolabe au GPS*
In : *Les mesures du territoire : Aspects techniques, politiques et culturels des mutations de la carte topographique* [en ligne]. Villeurbanne : Presses de l'enssib, 2015 (généré le 18 octobre 2023).
Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/pressesenssib/4253>>. ISBN : 9782375460702.
DOI : <https://doi.org/10.4000/books.pressesenssib.4253>.

Ce document a été généré automatiquement le 18 octobre 2023.

Le texte seul est utilisable sous licence . Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

Chapitre 1. L'invention de la précision : cartographie et technique de l'astrolabe au GPS

« Quelques-uns trouvaient singulier qu'une carte de la Basse-Bretagne ne présentât pas un coup-d'œil aussi agréable que celle des environs de Paris ; je ne pus m'empêcher de répondre que c'était la faute du pays et non celle des ingénieurs. »
Cassini Jean-Dominique, *Mémoires pour servir à l'histoire des sciences et à celle de l'Observatoire royal de Paris*, Paris, Bleuet, 1810, p. 124.

- 1 Le propos de cette partie n'est pas de faire une histoire des techniques cartographiques sur cinq siècles. Outre que cette question relève de l'histoire des techniques, ce qui n'est pas notre propos, il existe déjà une abondante littérature sur le sujet¹. Il s'agit donc plutôt de mettre en lumière les grandes étapes des transformations techniques qu'a connues la cartographie, et de montrer comment, avec l'emploi de méthodes géométriques et mathématiques de plus en plus perfectionnées, la description de la Terre passe de plus en plus par le calcul et la manipulation de chiffres. La géographie numérique telle qu'elle existe aujourd'hui, c'est-à-dire le traitement par ordinateur des données géographiques, dérive en partie de la longue évolution des méthodes mathématiques de la description topographique et de la géodésie. Quoique la science de la mesure de la terre remonte à l'Antiquité, c'est véritablement à l'époque moderne qu'elle se perfectionne, et qu'elle trouve une application systématique dans la cartographie. L'évolution générale de la cartographie du XVI^e siècle à nos jours correspond dans l'ensemble à une amélioration de la précision et à un enrichissement de l'information portée par les cartes. L'amélioration de la précision passe par la mise au point de méthodes pour déterminer la position d'un point à la surface de la Terre, ce qui suppose à la fois de concevoir des systèmes de coordonnées précis et de se doter d'instruments de mesure adaptés. La précision cartographique dépend également des procédés par lesquels les mesures sont ensuite traduites en cartes, avec les déformations et les approximations introduites par la projection, la mise à l'échelle, et les procédés de reproduction. Quant à l'enrichissement de l'information, il dépend du caractère plus ou moins complet des relevés effectués sur le terrain, des choix graphiques, et des limites matérielles inhérentes au support (taille et échelle des

feuilles, finesse de la gravure, emploi ou non de la couleur). Envisager les techniques cartographiques, c'est donc nécessairement considérer l'ensemble de la chaîne de production, depuis l'élaboration des théories géodésiques jusqu'à la production matérielle de la carte sur son support final, en passant par les étapes des relevés topographiques et de la conception graphique de la carte.

- 2 Lorsqu'on parle de cartographie scientifique, on n'ignore nullement les critiques contemporaines sur l'objectivité, la neutralité, ou au contraire la charge idéologique de la carte. Ces questions seront abordées plus tard. L'adjectif « scientifique » est utilisé ici simplement pour qualifier les cartes produites principalement au moyen de méthodes mathématiques à partir de mesures systématiques de la Terre. Il n'est pas question ici de la cartographie en général, mais bien d'un mode cartographique particulier, dont une des incarnations les plus représentatives est la carte topographique de l'Institut géographique national (IGN). Sur bien des plans, ces cartes sont le produit du rationalisme scientifique occidental sous sa forme la plus pure. Le propos principal de cette partie n'est pas de déconstruire de façon critique ce rationalisme, mais de montrer les métamorphoses du rôle de la mesure et du calcul dans la cartographie.
- 3 Les techniques cartographiques répondent aux besoins de leur époque en mettant en œuvre les instruments et les méthodes disponibles. Elles sont donc indissolublement liées au contexte scientifique et institutionnel à l'intérieur duquel elles se déploient. La carte topographique à grande échelle est celle qui demande l'emploi des méthodes les plus complexes et les plus coûteuses. C'est principalement ce type de cartes qui a bénéficié des progrès des mathématiques et des instruments. Sans ignorer tout à fait les autres types de cartes, on s'intéressera prioritairement à la carte topographique qui apparaît, sous sa forme moderne, avec la carte de France des Cassini. Cette naissance de la carte topographique est précédée par un grand renouveau de la cartographie à la Renaissance, avec la redécouverte des théories de la géographie antique.

Aux origines de la cartographie scientifique

- 4 La cartographie fondée sur la mesure et sur le calcul ne naît pas à la Renaissance. Le monde grec avait développé, au moins sur le plan théorique, un appareil mathématique qui proposait des méthodes pour résoudre les deux plus grands problèmes de la cartographie : la localisation et la projection. Le témoignage le plus précis que nous ayons sur la science géographique grecque est la géographie de Ptolémée² (mort vers 168). La géographie mathématique antique culmine lors de la période hellénistique et Ptolémée est d'autant plus important que l'essentiel de l'œuvre des autres théoriciens qui l'ont précédé (Dicéarque, Hipparque, Eratosthènes, Marinus de Tyr) est aujourd'hui perdue. Ptolémée propose un cadre mathématique unique pour localiser en longitude et latitude tout point à la surface de la Terre. Ce système de coordonnées peut être utilisé à la fois pour tracer des cartes du monde et des cartes régionales. Ptolémée propose aussi différentes méthodes pour reporter sur une surface plane des coordonnées sphériques, et des conseils pour la réalisation de globes. Le texte de Ptolémée contient également des références aux travaux d'autres géographes, et plus particulièrement un commentaire de Marinus de Tyr. On peut donc supposer qu'il existait une production cartographique dans le monde grec, au moins à l'usage des savants. Une grosse partie de la géographie de Ptolémée consiste en un catalogue de localités regroupées par région, avec leurs coordonnées géographiques. Malgré la

sophistication de l'appareil théorique de Ptolémée, et la bonne précision d'une grande partie des mesures, rien n'indique qu'il ait été fait dans l'Antiquité un large usage de ces méthodes cartographiques. Les cartes de l'Antiquité ont toutes été perdues. Il existait des représentations spatiales dans le monde romain, mais qui ne nécessitaient pas la mise en œuvre de la science géographique de Ptolémée³. Le grand plan de Rome gravé dans le marbre et connu sous le nom de *Forma Urbis Romae*, une représentation de la ville à l'échelle 1/240 d'une dimension de 13 m sur 18 composée un peu après l'an 200 et située à l'origine sur un mur du temple de la paix, relève de cette catégorie⁴. Quant à la plus connue des cartes du monde romain, la carte dite « de Peutinger », connue par une copie médiévale, c'est un rouleau de parchemin de près de 7 m de long qui présente des terres bizarrement déformées⁵ et dont l'origine, la fonction et la place dans la cartographie romaine restent assez mystérieuses⁶.

- 5 Il n'existe ni dans la langue grecque ni dans la langue latine de termes qui désigneraient sans équivoque une carte dans le sens moderne. Les mots grecs γεωγραφία et χωρογραφία (géographie, sous-entendue mondiale, et chorographie, c'est-à-dire géographie régionale) désignent indifféremment des descriptions, des nomenclatures de lieux et des cartes⁷. On trouve également πίναξ chez Hérodote⁸ et chez Plutarque⁹, ce qui peut désigner toute forme de tablette. Les mots latins susceptibles de désigner une carte sont multiples et ambigus : *forma*, *tabula*, *orbis*. De plus, dans tous les textes de l'Antiquité qui nous sont parvenus, rares sont les passages qu'on peut interpréter comme faisant mention d'une carte. Par exemple, il n'est pas absolument certain que la carte (le mot latin employé ici est *orbis*) dite d'Agrippa, citée par Pline l'Ancien dans son *Histoire naturelle*¹⁰, et qui aurait été visible au Porticus Vipsania, ait été une représentation graphique¹¹. De même, lorsque Cicéron se réfère dans une lettre à Atticus aux relevés de Dicéarque¹², il est impossible de savoir s'il s'agit de cartes ou d'une nomenclature de noms de lieux. Une mention chez Suétone¹³ d'une *orbis terrae depictum in membrana* (figure de la Terre peinte sur parchemin), semble plus clairement se référer à une forme de mappemonde.
- 6 Les études sur la cartographie antique sont relativement récentes et de nombreux points sont obscurs, mais il est néanmoins possible que l'usage des cartes dans le monde antique ait été beaucoup moins commun qu'on avait pu initialement le penser¹⁴. Que des cartes aient existé dans l'Antiquité est attesté, mais il n'est pas possible d'affirmer ni qu'elles aient été d'un usage courant, ni qu'elles aient joué un rôle important dans les conceptions de l'espace des sociétés antiques, qui semblent avoir préféré les descriptions géographiques purement textuelles¹⁵. On peut supposer que la confection et la copie de cartes, qui requièrent des compétences techniques moins communes que la copie de textes, n'étaient pas des activités très répandues. Pline l'Ancien, dans son *Histoire naturelle* (XXV-4), explique qu'utiliser des illustrations pour identifier les plantes, comme l'avaient proposé certains auteurs (Cratevas, Denys et Métrodore), est une méthode séduisante mais inapplicable en raison, entre autres inconvénients, des déformations introduites par les copistes. La reproduction de documents cartographiques présente la même difficulté, et les cartes, de ce fait, pourraient n'avoir pas été en grande circulation. Elles semblent avoir été utilisées au moins dans un but pédagogique. Le public athénien du v^e siècle était assez familier des cartes pour qu'Aristophane, dans *Les Nuées* (202-215), puisse tirer un effet comique d'un personnage qui confond la carte avec la réalité :

- 7 Tourneboule, vieillard athénien, se rend chez Socrate où il interroge un disciple sur divers instruments :
- « Tourneboule : Et ça ?
 Le disciple : Géométrie.
 Tourneboule : Ah ! Et à quoi ça sert ?
 Le disciple : À prendre la mesure de la Terre.
 Tourneboule : Celle qu'on répartit par lopins ?
 Le disciple : Non : toute la terre.
 Tourneboule : Brave idée ! Cette invention, ce sera profit pour tout le brave peuple !
 Le disciple : Ça, c'est la terre entière, tout en rond, tu vois ? Ici, Athènes.
 Tourneboule : Qu'est-ce que tu dis ? Pas de danger que je te croie : je ne vois pas de juges tenir séance.
 Le disciple : C'est pourtant vrai, je t'assure. C'est le terroir d'Athènes.
 Tourneboule : Et où sont ceux de Cicynna, les gars de chez moi ?
 Le disciple : Là, tiens, dans ce coin-là. Et voici l'Eubée, comme tu vois, tout en longueur, étirée, elle s'en va, elle s'en va !
 Tourneboule : Je sais : nous lui avons assez tiré dessus, nous et Périclès ! Et Sparte, où est-elle ?
 Le disciple : Où est-elle ? La voilà.
 Tourneboule : Qu'elle est près de nous ! Il faudrait l'éloigner de nous, pensez-y pour de bon : qu'elle s'en aille, qu'elle s'en aille ! » Aristophane, Théâtre complet, texte traduit, présenté et annoté par Victor-Henry Debidour, Paris, Le Livre de poche, 1965.
- 8 Ces cartes athéniennes n'étaient pas aussi sophistiquées que les cartes de l'époque hellénistique, car les principes de localisation et de projection n'avaient pas encore été formulés, mais la présence des instruments et la mention de la mesure montrent qu'elles étaient déjà construites sur des principes mathématiques.
- 9 Dans le monde romain, au premier siècle avant J.-C., dans une élégie de Propertius, une épouse de soldat se lamente en s'usant les yeux sur la carte des provinces lointaines où son mari a été envoyé en campagne¹⁶, ce qui peut laisser supposer que des cartes étaient en circulation chez des particuliers.
- 10 Même si le public antique était conscient de l'existence de cartes, les subtilités de leur construction et les principes mathématiques nécessaires à leur élaboration demeuraient probablement l'apanage de quelques savants. Strabon (mort vers 24) note d'ailleurs dans l'introduction de sa *Géographie*, œuvre essentiellement encyclopédique, que la connaissance détaillée des mathématiques géographiques n'est pas utile pour le public visé par son livre (hommes d'État et généraux) qui peut se contenter de notions élémentaires¹⁷. Même des savants pouvaient ainsi être assez peu au fait des théories astronomiques de leur temps. Ainsi Pascal Arnaud¹⁸ note-t-il que Plutarque, pourtant homme instruit et contemporain de Ptolémée, semble considérer que la terre est un disque semblable à une table¹⁹, une idée qui pourrait paradoxalement découler d'une interprétation erronée d'une mappemonde semblable à celle décrite au début de la *Vie de Thésée* (voir plus haut).

La cartographie médiévale

- 11 La cartographie du Moyen Âge est un peu mieux connue. Les cartes conservées sont assez nombreuses ; le plus souvent, elles illustrent des textes de manuscrits. Les cartes médiévales les plus abondantes sont des mappemondes très schématiques le plus

souvent du type dit en T-O, qui suivent un modèle décrit notamment par Isidore de Séville au VII^e siècle, où la Terre est figurée comme un disque²⁰. L'Est est situé en haut. Un diamètre horizontal figure la ligne Don-Nil et délimite l'Asie, figurée par le demi-cercle supérieur. Un rayon perpendiculaire sépare en deux la moitié inférieure et figure la Méditerranée, les deux quarts de cercle ainsi délimités représentent à gauche l'Europe et à droite l'Afrique. La figure générale de ces cartes est donc celle d'un T inscrit dans un O. On a souvent donné à ces cartes une interprétation symbolique liée au christianisme (la représentation tripartite symbolisant La Trinité, avec Jérusalem au centre du monde), ce qui a accru la thèse d'un abandon de la géographie scientifique au Moyen Âge au profit d'une géographie avant tout symbolique. Mais ces cartes n'apparaissent pas toujours dans un contexte où une symbolique chrétienne est présente (par exemple, en illustration d'auteurs antiques), et accompagnent parfois des représentations plus élaborées²¹. Leur succès vient plutôt de leur simplicité qui permet aux copistes les moins adroits de les reproduire. Elles ont presque une valeur d'icône ou de logo, mais ne reflètent pas l'état de la science géographique.

- 12 Bien que le texte de Ptolémée ait été indisponible en Occident du VI^e au XIV^e siècle, la science géographique antique n'avait pas été oubliée²². La carte de Peutinger montre que certains modèles antiques avaient été conservés. Si les grandes mappemondes ornementales médiévales n'avaient aucun cadre mathématique, étant dépourvues d'échelle et de système de projection, l'idée d'une géographie fondée sur la mesure de la Terre n'était pourtant pas étrangère à l'esprit du temps. En témoigne le succès de l'anecdote des « quatre sages de Jules César » qui apparaît entre la fin du V^e siècle et le début du VI^e, et qu'on trouve souvent répétée durant tout le Moyen Âge et les époques ultérieures. Selon ce récit rapporté d'abord avec quelques variantes dans plusieurs manuscrits de la *Cosmographie* de Julius Honorius puis dans divers ouvrages médiévaux de cosmographie et de géographie, Jules César aurait confié à quatre géomètres la mission de mesurer quatre parties du monde. La date d'apparition tardive du récit, diverses incohérences dans les dates mentionnées, et l'impossibilité de le corroborer par ce que l'on sait par ailleurs de la science géographique romaine laissent penser qu'il s'agit probablement d'une invention²³. Mais le succès même de l'histoire, comme le fait qu'elle figurait parfois dans la marge de mappemondes²⁴, prouve qu'il subsistait une certaine mémoire de la science géographique antique dans l'Europe médiévale.
- 13 La cartographie connaît des évolutions assez importantes vers les XIII^e et XIV^e siècles. Les portulans apparaissent au XIII^e siècle et se multiplient rapidement. Ces cartes à l'usage des navigateurs, où le seul élément géographique représenté est le trait de côte, ont un but pratique : elles sont l'équivalent graphique des instructions de navigation sous forme de texte, également appelées portulans ou routiers²⁵, qu'utilisaient les marins pour la navigation à l'estime²⁶. L'apparition des cartes n'a d'ailleurs pas mis fin à l'usage des instructions textuelles. Les portulans sous forme cartographique semblent s'être banalisés à la faveur de l'introduction en Occident de la boussole. Le détail des contours côtiers apparaît sur les portulans plus précis que sur les mappemondes, même sur les exemples les plus anciens, comme la carte pisane. Cette précision est requise par leur usage. Les techniques utilisées pour dresser ces cartes ne sont pas connues avec certitude : elles ne sont pas issues des cabinets des savants et ne sont donc pas accompagnées d'un appareil théorique. Il semble cependant que ces cartes soient des constructions empiriques à partir de caps magnétiques et de navigation à l'estime, sans utiliser de coordonnées géographiques, sans faire d'hypothèse sur la forme de la Terre,

et sans système de projection²⁷. Elles concernent essentiellement la Méditerranée. Même si certaines conventions graphiques des portulans sont progressivement adoptées par les mappemondes, comme les roses des vents et les loxodromes²⁸, ils représentent, du point de vue des techniques cartographiques, une voie séparée qui n'a pas eu de postérité.

- 14 La cartographie de la fin du Moyen Âge connaît d'autres mutations importantes. Une des principales est la redécouverte du texte de la *Géographie* de Ptolémée, dont le texte grec, retrouvé à Byzance, parvient à Florence à la toute fin du xiv^e siècle. Il est rapidement traduit en latin, augmenté de cartes réalisées suivant les indications du texte, et largement diffusé, d'abord sous la forme de nombreux manuscrits, puis, dès la fin du xv^e siècle, d'éditions imprimées. Outre le prestige attaché au nom de l'auteur, le succès de l'ouvrage s'explique par l'efficacité du système de localisation en latitude et longitude qu'il proposait, et qui permettait d'unifier dans un cadre mathématique unique les cartes à toutes les échelles. L'idée de coordonnées géographiques en latitude et longitude n'était pas inconnue en Occident. Peut-être ces notions étaient-elles passées en Europe par l'Espagne musulmane vers la fin du xi^e siècle, la tradition ptoléméenne ayant survécu dans le monde arabe. La pratique de l'astrologie, qui nécessitait de préciser le lieu de naissance, en avait répandu l'usage depuis environ le xii^e siècle, et le système en usage pour noter la position des astres utilisait des coordonnées sphériques similaires. Roger Bacon, au xiii^e siècle, avait proposé un système de coordonnées terrestres en principe applicable à la géographie²⁹. La cartographie cependant n'a pas employé les systèmes de coordonnées avant le xv^e siècle et la diffusion des œuvres de Ptolémée. Dans le monde relativement clos et stable du Moyen Âge, où les grandes mappemondes pouvaient reprendre avec peu de modifications les modèles anciens, la nécessité d'un système de coordonnées universelles n'était guère impérieuse. En revanche, à l'aube de la Renaissance, dans un monde élargi par les explorations des voyageurs terrestres et marins, le besoin de situer les terres nouvelles par rapport à l'Ancien Monde conduit à l'adoption rapide du système des coordonnées géographiques, sans éteindre immédiatement la tradition des mappemondes médiévales. Ainsi, la grande mappemonde publiée à Venise par Fra Mauro vers 1450, bien qu'elle intègre des parties de l'Asie nouvellement décrites notamment par Marco Polo, reste dans la tradition médiévale. Fra Mauro éprouve cependant le besoin de préciser pourquoi il choisit de ne pas suivre Ptolémée, à qui il reproche notamment de ne pas être complet³⁰. Cette attitude illustre l'ambiguïté de cette redécouverte de Ptolémée : les méthodes mathématiques ouvrent des perspectives nouvelles, mais les données géographiques, qui forment l'essentiel du volume du texte, sont celles du monde hellénistique.
- 15 La conjonction des grandes découvertes, de l'imprimerie, des techniques nouvelles et de l'intérêt renouvelé pour la géographie antique font des xvi^e et xvii^e siècles une des périodes les plus foisonnantes de l'histoire de la cartographie.

Les mutations de la cartographie à l'aube de l'ère moderne

- 16 Le terme d'ère moderne est conforme aux divisions conventionnelles des historiens. On peut juger que cette dénomination est problématique, dans la mesure où elle semble

impliquer l'idée d'un progrès plus ou moins linéaire. Les faits ne sont pas si simples, mais puisque notre propos n'est pas une histoire de la cartographie mais plutôt une enquête sur les rapports entre les chiffres et l'espace, et qu'à bien des égards on peut identifier la modernité, entre autres choses, comme un processus par lequel la mesure et le calcul deviennent des outils de plus en plus importants de description du monde³¹, les termes d'ère moderne ou de cartographie moderne sont ici appropriés.

- 17 Un autre inconvénient de l'usage du terme « moderne » est de paraître privilégier l'idée de rupture par rapport aux phénomènes de continuité. S'il est vrai que la tradition cartographique médiévale ne s'est pas brusquement éteinte à la fin du xv^e siècle, les débuts de l'ère moderne sont caractérisés par des bouleversements suffisamment importants dans la production, la diffusion, et l'utilisation des cartes en Europe pour qu'il ne soit pas illégitime d'y voir une période charnière. Le plus incontestable de ces bouleversements concerne probablement le nombre de cartes en circulation. Selon David Woodward³², entre le xv^e siècle et le xvii^e siècle, le nombre de cartes en circulation passe de quelques milliers à plusieurs millions. Cela traduit non seulement l'effet de la diffusion de cartes imprimées mais aussi la multiplication des usages de la carte, notamment dans l'administration et chez les particuliers.
- 18 Un autre bouleversement est l'adoption progressive, d'abord pour les cartes à petite échelle, du système de coordonnées géographiques hérité de Ptolémée. Là où les mappemondes médiévales présentent un monde organisé autour d'un centre (le plus souvent, particulièrement après les croisades, Jérusalem) le système de coordonnées géographiques construit un espace abstrait, purement géométrique, dans lequel il n'existe *a priori* aucune hiérarchie des lieux. Contrairement au système clos de la mappemonde médiévale, la carte fondée sur les coordonnées géographiques se prête à l'inscription des terres nouvellement découvertes que l'on peut ancrer aux parties du monde déjà connu en les assignant à leur place dans l'espace géométrique préexistant.
- 19 Construire une carte à partir de coordonnées géographiques implique nécessairement de se poser le problème de la projection, c'est-à-dire du report des coordonnées sur le plan de la feuille. La question de la projection avait été abordée par Ptolémée, mais il proposait des solutions adaptées au monde connu de son temps, limitées à la représentation d'un seul hémisphère. La Renaissance a été une période fertile en invention de projections nouvelles, mieux adaptées à la représentation de la Terre entière. L'intérêt pour ces questions est à replacer dans le contexte plus global du renouvellement des arts visuels, et en particulier de la formalisation des techniques de représentation en perspective, qui posent des problèmes proches de ceux des projections cartographiques³³. Plus d'une quinzaine sont mises au point avant 1670³⁴. La construction d'un système de projection peut être plus ou moins empirique, ou au contraire d'un grand raffinement mathématique (la construction précise des projections de la Renaissance n'est pas toujours connue ; on suppose qu'elles se fondaient sur des méthodes graphiques)³⁵, mais elle se traduit par la définition d'une échelle. Cette échelle peut éventuellement ne pas être constante pour les différentes parties de la carte, mais sa détermination et ses variations dépendent du système choisi et du support de la carte, et ne sont pas laissées à l'arbitraire du cartographe comme dans les cartes non projetées. L'apparition sur la carte de l'échelle et des lignes figurant les méridiens et les parallèles signale l'émergence d'une cartographie où la mesure et le calcul occupent le premier rôle.

- 20 L'introduction de la latitude et de la longitude n'a pas transformé la cartographie du jour au lendemain. S'il s'agissait d'une avancée théorique importante, sa portée pratique était plus limitée, du moins dans un premier temps. La mesure concrète des coordonnées géographiques se heurte à des difficultés pratiques lorsqu'il s'agit de collecter les latitudes et longitudes de lieux précis. La détermination de la latitude est simple, surtout dans l'hémisphère nord où il suffit de mesurer la hauteur du pôle Nord céleste, mais celle de la longitude nécessite des observations astronomiques plus complexes. Le principe le mieux connu à la Renaissance suppose l'observation simultanée d'une éclipse de lune à un lieu dont la longitude est connue et à un autre dont on veut déterminer la position. La différence entre les heures locales des deux observations permet de déterminer l'écart de longitude. Dès le milieu du xv^e siècle, il a été suggéré de déplacer une horloge portative pour mesurer les longitudes, mais le manque de précision des horloges de l'époque rendait cette méthode inapplicable. L'Allemagne, la France, l'Angleterre, l'Italie, l'Espagne et le Portugal comptaient, aux xv^e et xvi^e siècles, suffisamment de savants pour enrichir petit à petit les tables de coordonnées géographiques, non sans introduire des erreurs parfois importantes³⁶. Faute de mesures, les coordonnées de nombreuses localités devaient être déduites à partir des distances avec des lieux de coordonnées connues, au risque d'introduire de nouvelles erreurs.
- 21 Les techniques de mesure de la Terre par les géomètres-arpenteurs, pour les besoins de l'établissement du cadastre ou la construction d'ouvrages d'art, étaient déjà bien connues dans le monde romain. Les *agrimensores* romains savaient découper les terrains en figures géométriques simples pour les mesurer. Leur savoir, consigné dans des textes³⁷, était connu et assez bien diffusé au Moyen Âge. Ces techniques, cependant, restent cantonnées à des travaux locaux et restent étrangères à la science cartographique à proprement parler jusqu'à la fin du xv^e siècle. La Renaissance voit la formalisation des principes de la triangulation pour la mesure des grandes longueurs, vers le début du xvi^e siècle. À partir de la seconde moitié du xvi^e siècle, les traités de cartographie exposent des méthodes de triangulation applicables à la cartographie. Les cartes produites à l'époque ne semblent pas en faire usage. Les instruments de mesure, malgré le déploiement d'une ingéniosité considérable dans leur conception, ne permettent que rarement d'atteindre la précision théorique des méthodes décrites, même si certains auteurs proposent des astuces pour se passer des mesures numériques des angles, les plus difficiles³⁸. De plus, sauf à se contenter de quelques mesures ponctuelles, une triangulation utilisable en cartographie suppose une entreprise d'un coût et d'une durée peu compatibles avec le contexte troublé de l'Europe du xvi^e siècle, où il est de plus impossible de s'appuyer sur un réseau de points de coordonnées connues avec une précision suffisante. La pratique cartographique de la Renaissance était ainsi marquée par un retard sensible par rapport aux avancées théoriques, aussi bien pour l'usage des coordonnées géographiques que pour les techniques de relevés topographiques. Seule la pratique empirique des projections était en avance sur leur formulation mathématique rigoureuse.
- 22 Même si elles ne sont pas mises en pratique, ces avancées théoriques sont extrêmement importantes. Elles effacent la frontière que Ptolémée avait tracée entre la géographie mondiale, fondée sur la mesure de la mathématique, et la description régionale, relevant surtout de la description empirique. Elles ouvrent la voie à la cartographie scientifique aux grandes échelles.

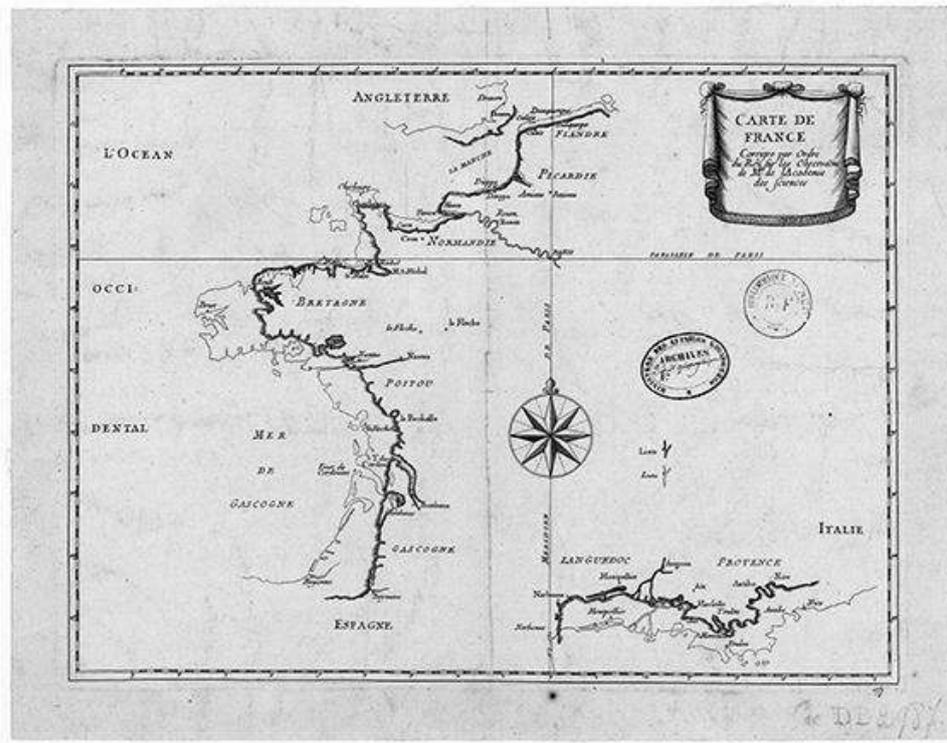
Naissance de la cartographie moderne : de Louis XIV à la carte de Cassini

- 23 Aux XVII^e et XVIII^e siècles, une conjonction de facteurs favorise les grandes entreprises cartographiques. Les sociétés savantes européennes comme la Royal Society de Londres, ou surtout l'Académie royale des sciences de Paris, avec l'encouragement des États, raffinent les méthodes de mesure. L'Académie des sciences, en particulier, entre la fin du XVII^e siècle et le début du XVIII^e, multiplie les mesures de longitude dans le but de préciser le tracé des côtes françaises et d'améliorer la localisation d'un certain nombre de lieux à l'étranger. La demande cartographique croissante des États, pour l'administration et pour la guerre, apporte un support financier aux expériences et aux expéditions qui cherchent à améliorer la précision des mesures de la Terre. Enfin, les instruments scientifiques se perfectionnent, tant dans le domaine de l'observation du ciel que dans celui de la mesure du temps, deux domaines clés pour la précision des mesures géographiques.
- 24 C'est en France, à partir du règne de Louis XIV, que s'élaborent les méthodes de la cartographie scientifique moderne. Bien qu'elle soit assez connue, l'entreprise, étendue sur plus d'un siècle, est d'une importance telle dans l'histoire des relations entre la mesure et la cartographie qu'elle mérite qu'on s'y arrête un peu en détail. Il est en particulier utile de détailler un peu la chronologie pour comprendre pourquoi plus de 120 ans s'écoulaient entre le moment où le projet est formé et la fin de sa réalisation.
- 25 Fondée en 1666, l'Académie des sciences reçoit pour mission en 1668 de travailler à l'amélioration de la cartographie de la France et à la mise au point de méthodes cartographiques nouvelles³⁹. Il existait à l'époque, en France comme dans d'autres pays d'Europe, des cartes dressées dans les différentes provinces (une instruction de Colbert, de 1663 avait commandé de les réunir pour en évaluer la qualité), mais elles n'étaient homogènes ni par l'échelle, ni par la précision. Après des expérimentations dans la région parisienne, sous la direction de Roberval et Picard, ce dernier, qui s'est adjoint la collaboration de Dominique Cassini, présente à l'Académie un rapport sur la méthode cartographique en 1669. Ce rapport assez bref, reproduit intégralement dans un article de Lucien Gallois⁴⁰, établit plusieurs points fondamentaux. Il propose d'établir une première grande triangulation qui servira d'appui aux travaux topographiques ultérieurs, fixant ainsi la méthode topographique moderne qui découple la construction de la triangulation géodésique des travaux topographiques de terrain. Cette triangulation emploiera des quarts de cercles à lunettes, plus précis que les instruments à pinnule utilisés auparavant. Picard suggère en outre que ces opérations de triangulations pourraient servir à préciser le diamètre terrestre. Cette question de la mesure d'un « grand degré », soit la longueur d'un degré d'une géodésique, doit lever les incertitudes sur la taille de la Terre (Newton n'a pas encore publié sa théorie de l'aplatissement du globe et il n'y a donc pas encore de débat sur la variation de la longueur du degré d'arc méridien selon la latitude). Dans le même rapport, Picard évoque le problème des unités à employer pour ces travaux, et propose « pour donner une mesure qui demeurât à la postérité et qui ne dépendît point de la nôtre particulière [de se] servir de la longueur qui est nécessaire pour un pendule à seconde de temps déterminant combien de fois cette longueur serait contenue dans un grand degré sur terre »⁴¹. Curieusement, Gallois ne commente pas cette proposition, qui

n'a pas été retenue. Il est assez intéressant de voir apparaître, plus d'un siècle avant la définition du mètre, une proposition d'unité de mesure universelle fondée sur une mesure physique, dans un contexte lié à la mesure de la Terre. Picard souligne l'élégance de sa solution, qui, en liant l'unité de longueur à un sous-multiple de la durée du jour (la seconde), unirait la mesure de la Terre à son mouvement diurne. C'est une des premières propositions pour lier les unités de mesures à la mesure de la Terre. Grâce à son nouvel instrument, Picard est capable de procéder lui-même à une mesure du degré méridien par la triangulation (en treize triangles) d'un arc entre Paris et Amiens en 1671. Sa mesure est aussi précise que le permettaient les connaissances astronomiques et optiques de son temps, et la méthode générale ne diffère pas substantiellement de ce qui sera pratiqué jusqu'à l'invention du GPS⁴². Les triangles de Picard permettent l'établissement d'une première carte de la région parisienne, présentée à l'Académie en 1681 par Vivier, qui avait participé aux premières expériences.

- 26 Parallèlement, Picard, Cassini, Vivier et quelques autres multiplient les observations astronomiques pour fixer précisément la latitude de nombreuses villes de France. À partir de 1681, l'astronome danois Rømer publie des éphémérides pour les éclipses des satellites de Jupiter, corrigées pour tenir compte de la vitesse finie de propagation de la lumière. Ces éclipses, qui sont des événements astronomiques fréquents, prévisibles, et indépendants de l'heure terrestre locale, sont utilisables pour calculer la longitude d'un lieu. Les observations se multiplient et font apparaître des erreurs importantes et nombreuses dans les positions habituellement admises.

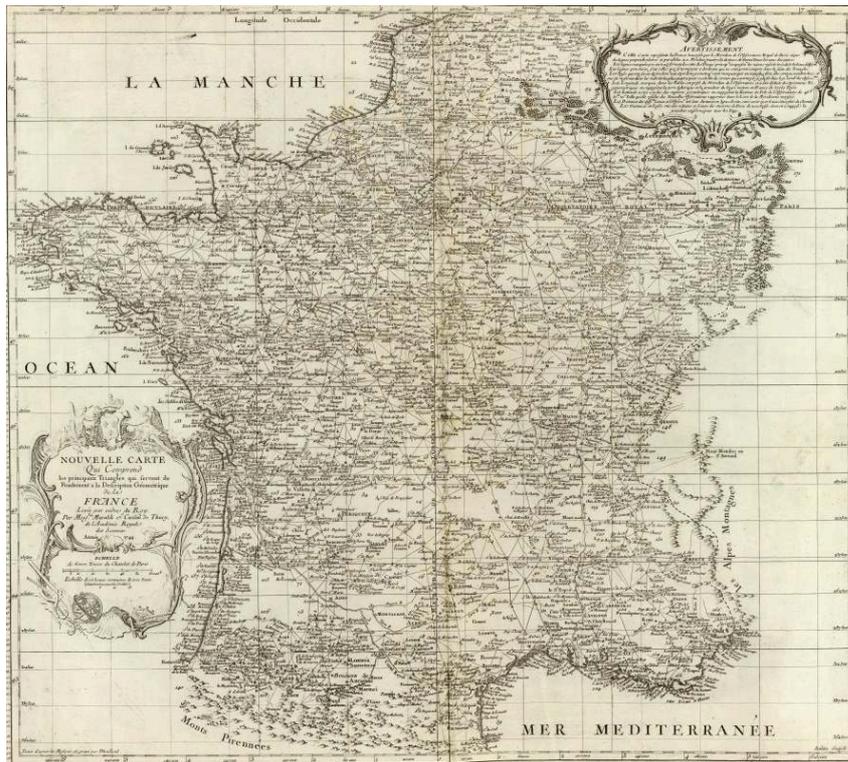
Carte des côtes de la France, corrigée par l'Académie, 1693. Source : Bibliothèque nationale de France, 2015



- 27 Dans un premier temps, les observations permettent de rectifier le tracé des côtes atlantiques. En 1681, Picard présente un nouveau mémoire dans lequel il insiste de

nouveau sur la nécessité de construire « un grand châssis », formé de grands triangles assemblés qui fixeraient un cadre pour toutes les levées topographiques. La méridienne de 1671 pourrait servir de point de départ à cette triangulation, en la prolongeant vers le nord et le sud jusqu'aux extrémités du royaume. Picard meurt en 1682. Cassini lui succède pour la prolongation de la méridienne, mais la mort de Colbert et son remplacement comme protecteur de l'Académie par Louvois, moins intéressé par la cartographie et soucieux d'employer les savants à des travaux d'une utilité plus immédiate, interrompt les travaux. À la fin du xvii^e siècle, la guerre de la Ligue d'Augsbourg absorbe l'essentiel des ressources du royaume et l'Académie souffre d'un manque de crédit. Les opérations sur la méridienne ne reprennent qu'en 1700. Cassini reprend le travail secondé par son fils Jacques et atteint Collioure en 1701. Le prolongement vers le nord est retardé par la guerre de succession d'Espagne. Jacques Cassini, qui a succédé à son père, effectue les mesures vers le nord en 1718. Incidemment, le prolongement de la méridienne pousse Jacques Cassini à contester l'aplatissement de la Terre prédit par Newton, car, à la suite d'erreurs de mesure, il croit observer un allongement des degrés en direction de l'équateur. La mesure d'un grand cercle perpendiculaire à la méridienne entre Saint-Malo et Strasbourg, en 1733 et 1734, semble confirmer ce résultat. C'est le début d'une querelle qui passionne les savants pendant des années et qui ne sera tranchée en faveur de Newton qu'au prix d'expéditions en Laponie et au Pérou (actuel Équateur) en 1737 et en 1744. Dès les résultats de l'expédition de Laponie, il apparaît nécessaire de reprendre la méridienne de Cassini, travail qui échoit en 1739 à César-François Cassini de Thury, fils de Jacques. Les progrès des instruments et le soin particulier apporté aux mesures permettent de produire une chaîne très précise. Le choix des sommets est si bon que la même chaîne, ou presque, a été employée pour les triangulations ultérieures, en 1795 et en 1875. Diverses opérations de triangulation sont effectuées jusqu'en 1744, pour aboutir à un canevas géodésique complet d'environ 800 triangles. Le résultat est publié en 18 planches qui forment une carte à une échelle légèrement supérieure au 1/1 000 000 et sur laquelle, outre les triangles, sont figurés les principaux cours d'eau et forêt. La légende de la carte prend bien soin de distinguer « les lieux dont la position est exactement déterminée » des éléments dont la position a été copiée à partir de « différentes cartes particulières des Provinces », pour lesquels « on ne doit pas être surpris si leur situation, leur grandeur et leurs contours se trouvent entièrement défigurés »⁴³.

Nouvelle carte qui comprend les principaux triangles qui servent de fondement à la Description géométrique de la France, 1744. Source : Bibliothèque nationale de France, 2015



- 28 Louis XV, qui avait eu recours aux services de Cassini de Thury en Flandres, en 1746, pour assister les ingénieurs militaires⁴⁴ dans des opérations de triangulation et de levées topographiques, lui commande l'exécution d'une carte de France à grande échelle. Les levées topographiques systématiques commencent en 1750. Lorsque les fonds viennent à manquer en 1756, les coûts de la guerre modifiant une fois de plus les priorités budgétaires du royaume, Cassini de Thury réunit des capitaux privés, davantage mécènes qu'investisseurs⁴⁵, et sollicite les provinces intéressées à voir dresser leur carte⁴⁶. La carte en 180 feuilles est publiée progressivement. Les levées sont achevées en 1789, et les dernières feuilles sont publiées en 1815⁴⁷. La longueur de l'entreprise et les dépassements de coût s'expliquent par la nécessité de recruter et de former de nombreux graveurs et ingénieurs qui doivent employer des techniques nouvelles⁴⁸, et par les difficultés concrètes des levées de terrain : les ingénieurs n'étaient pas toujours bien reçus dans les provinces (l'un d'eux a été grièvement blessé et Cassini de Thury lui-même a été en une occasion accueilli à coups de fusil), ou au contraire étaient accaparés par les seigneurs locaux qui souhaitaient les employer à des travaux topographiques sur leurs terres⁴⁹. Après la mort de Cassini de Thury, en 1784, son fils Jean-Dominique reprend la direction de l'entreprise, jusqu'à la nationalisation de la carte par la Convention, en 1793.
- 29 Malgré les retards et les difficultés d'exécution, la carte de Cassini, fixe pour deux siècles le modèle d'exécution d'une carte à grande échelle pour tous les services cartographiques du monde. Les raffinements ultérieurs de la méthode concernent l'amélioration de la précision des levées, la construction de référentiels géographiques plus précis, et le travail sur les systèmes de projection.

Extrait de la carte de Cassini, feuille de Lyon, 1762. Source : © IGN, 2015



L'amélioration de la précision des mesures de la méridienne de Delambre et Méchain à la seconde guerre mondiale

- 30 Le principe de la triangulation et de la construction de réseaux géodésiques d'appui pour les levés topographiques reste le mode standard de production des cartes scientifiques de base jusqu'à l'ère spatiale. Des perfectionnements sont apportés à la mesure et à l'indication de l'altitude, information absente des cartes de Cassini, mais pour la localisation horizontale, seuls évoluent les instruments et la précision des unités. Les unités d'Ancien Régime étaient d'une grande confusion, variables d'une région à l'autre, avec des multiples et sous-multiples malcommodes, et leurs étalons imprécis. La suggestion de Picard pour l'adoption d'une unité nouvelle n'ayant pas été retenue, toutes les levées de la carte de Cassini avaient été effectuées sur le système d'unités parisien, dont l'étalon était la toise du Châtelet, définie comme la distance séparant deux ergots métalliques fixés dans un mur du vieux Châtelet. Le frottement des règles que les commerçants venaient placer entre les ergots pour en vérifier l'exactitude avait probablement causé une certaine usure, si bien que la longueur de 1,9490366 m mesurée en 1799 était probablement un peu supérieure à la valeur d'origine, lors de son institution en 1667. L'utilisation de cette unité explique le choix de l'échelle de la carte de Cassini, 1/86 400, soit une ligne pour 100 toises⁵⁰. La discussion sur l'instauration d'unités de mesures plus adaptées remontait au moins à la fin du XVII^e siècle. Les savants des différents pays européens, en particulier, ressentaient fortement la nécessité d'avoir des mesures communes. Aussi l'idée de fixer un étalon qui ne dépendrait pas d'un modèle national était-elle importante. Le contexte de la Révolution, favorable en général aux réformes, était propice à la mise en œuvre d'une révision des systèmes de mesure. En 1791, une commission formée de Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet propose deux des grandeurs les plus couramment admises pour fixer un étalon de longueur : la longueur d'un pendule battant la seconde (au niveau de la mer à 45° de latitude), ou la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. En 1668, Wilkins avait écarté le méridien terrestre comme base de l'étalon de longueur, en raison des incertitudes sur sa mesure. Les acquis de la géodésie et de l'astronomie du XVIII^e siècle permettent désormais de l'envisager. La commission tranche en sa faveur, en soulignant que le pendule battant

la seconde renferme « un élément hétérogène, qui est le temps, et un élément arbitraire, la division du jour en 86 400 secondes », au contraire de la référence à la circonférence terrestre. Il restait à se décider entre l'équateur et un méridien. Outre les considérations pratiques, le méridien est préféré à l'équateur, car seuls quelques peuples vivent sur l'équateur, tandis que tous ont un méridien⁵¹. Delambre et Méchain sont chargés de tracer une nouvelle méridienne de Dunkerque à Barcelone (9,5°) pour déterminer la longueur d'un quart de méridien. Cette nouvelle mesure était d'autant plus précise que l'arc était long, et les progrès des instruments depuis la triangulation des Cassini devaient limiter les erreurs à la fois dans la mesure des bases et celle des angles. Pour la mesure des bases, des toises de bois dans lesquelles étaient insérées des règles de deux métaux différents (laiton et platine) corrigeaient les variations de longueurs dues aux changements de température. Le cercle répétiteur de Borda, en multipliant les mesures pour un même angle, réduit les erreurs. Ce dernier instrument est resté en usage durant tout le XIX^e siècle⁵². Les troubles liés à la Révolution ralentissent les travaux, mais la méridienne est mesurée en 7 ans. Un congrès international de savants est convoqué à Paris en 1778 pour vérifier l'exactitude des mesures. Les résultats ne sont pas entièrement compatibles avec les valeurs admises de l'aplatissement de la Terre, dont on commençait à soupçonner que la véritable forme était irrégulière⁵³. Ils permettent cependant de définir le mètre, adopté en 1799⁵⁴.

- 31 Le passage au système métrique est un événement d'une portée considérable à la fois sur le plan pratique, politique et symbolique. C'est un moment décisif de l'histoire des rapports entre la science et la politique, et plus encore de celle des rapports entre la mesure et l'espace. Au-delà du principe d'unification nationale, c'est tout un nouvel ordre numérique qui s'impose (non sans résistance) à la société. Le choix du système décimal rendait ainsi caduque tout l'ancien système de mesures dont on ne pouvait, sous peine de confusion, conserver les noms⁵⁵, contrairement à ce qu'avait jadis proposé Picard. L'abandon des fractions usuelles des anciens systèmes (1/6, 1/12) déstructure les manières de compter qu'une longue habitude avait ancrées. Ces mathématiques de savants se heurtent à l'arithmétique de la vie quotidienne. La nouvelle mesure est également une rupture avec la tradition des mesures qui, en nom au moins, se rapportaient à une proportion du corps humain, comme le pied ou le pouce. La toise même était supposée représenter l'espace des bras étendus d'un adulte. Le mètre détache l'idée de mesure d'un rapport avec le corps. Dans le système ancien, la terre était mesurée comme un multiple du corps de l'homme. Le système métrique renverse la perspective, en faisant de la mesure de la Terre la mesure des mesures⁵⁶, et c'est désormais le corps de l'homme qui est mesuré par une fraction de la dimension terrestre.

La question de la forme de la Terre

- 32 À partir du moment où il a été démontré que la terre n'était pas une sphère parfaite, la détermination plus précise de sa forme a été une préoccupation constante des savants. La méthode employée pour connaître cette forme est celle de la mesure des arcs méridiens sous différentes latitudes et longitudes. En 1805, dans la première édition du *Traité de géodésie* de Louis Puissant, futur concepteur de la carte d'état-major, 7 mesures sont recensées, toutes effectuées au XVIII^e siècle⁵⁷. D'autres mesures importantes sont effectuées au début du XIX^e siècle, en particulier en Inde par les Anglais, mais même en

prenant en compte l'imprécision des mesures passées, les données disponibles montrent déjà que tous les méridiens n'ont pas exactement la même forme et qu'ils ne sont pas des ellipses régulières, comme Delambre avait pu le soupçonner. À partir de cette époque, à mesure que les pays européens et leurs colonies font l'objet de relevés géodésiques (principalement l'Angleterre à partir de 1791, la plupart des États européens au tournant du siècle, puis les Indes et les États-Unis dans le courant du XIX^e siècle) et que les travaux cartographiques progressent, la définition des ellipsoïdes devient un des enjeux majeurs de la géodésie.

- 33 Les cartographes de l'époque révolutionnaire avaient envisagé une extension du réseau de triangulation français sur les pays voisins, voire à l'ensemble du monde. Des chaînes de triangles avaient été tracées vers l'Angleterre jusqu'à Greenwich en 1787, et la méridienne de Delambre et Méchain avait servi de base à une chaîne de triangles longeant la côte espagnole et atteignant les Baléares en 1808. Mais le contexte des guerres napoléoniennes et les rivalités entre États européens ne sont pas favorables aux coopérations internationales. Dès les premières décennies du XIX^e siècle, l'irrégularité de la forme de la Terre ne fait plus guère de doute, et les cartographies nationales ont tendance à se caler sur des systèmes de coordonnées propres. C'est aussi une conséquence de l'amélioration de la précision des mesures et du raffinement des méthodes mathématiques qui exigent des référentiels de plus en plus finement définis.
- 34 Dès la fin du XVIII^e siècle, Laplace, dans son *Traité de mécanique céleste*⁵⁸, avait envisagé l'intérêt des ellipsoïdes locaux. À partir des années 1830, on voit se multiplier les ellipsoïdes locaux⁵⁹. Ces ellipsoïdes sont généralement tangents à la surface du globe (ramenée au niveau de la mer) sur un point du territoire particulier, et proches de cette surface le long du méridien local et de la géodésique perpendiculaire au méridien en ce même point. Le premier ellipsoïde rigoureusement défini pour la France est celui de Delambre, 1810, utilisé pour la carte d'état-major (voir plus bas) sous une forme légèrement corrigée connue sous le nom de Plessis 1817 (la correction ramène le quart de méridien à exactement 10 000 000 mètres). Il ne s'appuie que sur la méridienne de Delambre et Méchain, faute de disposer de mesures assez rigoureuses de longitude⁶⁰. L'ellipsoïde adopté pour la nouvelle carte de France, à la fin du XIX^e siècle, est représentatif de ces ellipsoïdes locaux : il est fondé sur celui dit de « Clarke 1880 », son point de référence est situé à Paris, à la verticale de la coupole du Panthéon⁶¹, et son méridien origine est celui de Paris. Le choix d'un ellipsoïde de référence est une décision importante, car elle conditionne toute la chaîne de production cartographique. Ainsi, la géographie britannique a adopté en 1830 un ellipsoïde (Airy) dont la précision s'est par la suite révélée perfectible, mais qui est cependant resté en usage jusqu'à la fin du XX^e siècle, toutes les levées en étant dépendantes⁶².
- 35 En 1910, un document « non exhaustif » de l'IGN recensait neuf ellipsoïdes différents en usage pour la seule Europe⁶³. En général, les spécialistes de géodésie des différents pays collaborent autant que le permet l'état des relations diplomatiques du moment, car la question générale de la forme de la Terre exige de collecter et d'échanger des données en provenance de tous les points du globe. En dépit de la constitution d'une association géodésique internationale en 1864, et malgré des tentatives pour définir un système de référence mondial, les ellipsoïdes locaux restent en usage jusqu'à la fin du XX^e siècle, principalement parce qu'ils forment la base des cartographies nationales.

L'évolution des cartes

- 36 La carte de Cassini était un modèle du point de vue des méthodes mises en œuvre, mais elle n'était pas adaptée à toutes les applications. Toutes ses feuilles avaient été levées avant la Révolution, et les plus anciennes étaient obsolètes lors de la parution des dernières, en 1815. Les plaques de cuivre utilisées pour l'impression étaient parfois altérées. En outre, la figuration du relief y était très sommaire, car la triangulation n'avait pas été complétée par un nivellement systématique. Napoléon avait formé dès 1808 le projet d'une nouvelle carte de France, mais les campagnes militaires ont retardé l'entreprise jusqu'au règne de Louis XVIII. En 1817, à peine deux ans après la parution des dernières feuilles de la carte de Cassini, est mise en chantier la nouvelle carte de France (future carte d'état-major), qui devait aussi servir au renouvellement du cadastre. Cette carte doit être fondée sur une nouvelle triangulation afin de bénéficier de l'amélioration de la précision des instruments depuis la triangulation des Cassini. Cette triangulation est confiée au corps des ingénieurs géographes, sauf pour les observations astronomiques, réservées au bureau des longitudes. Les ingénieurs géographes étaient un ancien corps de militaires réorganisé après la Révolution pour effectuer des travaux topographiques, et dont de nombreux membres avaient effectué des levées pendant les campagnes de Napoléon. Les stations de premier ordre devaient être signalées par des bornes dont on aurait mesuré l'altitude, et qui pourraient servir de référence pour les nivellements particuliers à entreprendre par les ingénieurs des ponts et chaussées. Les opérations géodésiques, comprenant la triangulation, les observations astronomiques et des travaux de nivellement durent de 1818 à 1845⁶⁴. La publication de la carte elle-même, par feuilles au 80 000^e, se termine en 1880. Les levées étaient reportées au 1/10 000 sur des feuilles-minutes, au nombre de 64 par feuille à graver, avec un relief figuré en courbes de niveau traduites par des hachures sur la carte. La précision des levées était sensiblement supérieure à celles de la carte de Cassini. En outre, la projection choisie était plus élaborée. La carte de Cassini utilisait une projection assez simple, un aspect transverse d'une projection équirectangulaire centrée sur le méridien de Paris. La carte d'état-major utilise la projection de Bonne⁶⁵, une projection équivalente assez ancienne reformulée au XVIII^e siècle par Rigobert Bonne qui a donné une expression mathématique à une construction géométrique utilisée auparavant.

Extrait de la carte d'état-major, feuille de Lyon, 1841. Source : © IGN, 2015



- 37 La durée d'exécution de la carte d'état-major a été moindre que celle de la carte de Cassini. L'expérience acquise, le progrès des instruments, l'existence d'un corps d'ingénieurs qualifiés, le fait de travailler dans un pays moins troublé et au territoire unifié ont permis de terminer l'entreprise en un peu moins de 60 ans. Cette durée est conforme à ce qu'il était possible de réaliser avec les techniques de l'époque, mais la carte d'état-major n'échappe pas à l'inconvénient ordinaire d'une entreprise qui atteint sa conclusion plus d'un demi-siècle après sa conception originelle : la carte livrée ne répondait plus exactement aux besoins du temps. Les travaux préliminaires de géodésie n'étaient pas sans défaut, montrant en particulier aux points de fermeture de chaînes des écarts de coordonnées supérieurs à ce qu'un travail soigneux avec les techniques disponibles à l'époque aurait pu produire⁶⁶. De ce point de vue, la méridienne de Delambre était supérieure, mais la somme de calculs qu'il aurait fallu exécuter pour obtenir une compensation satisfaisante sur une triangulation aussi étendue était trop importante par rapport aux moyens disponibles. La mathématisation de plus en plus poussée de la cartographie requiert des spécialistes en grand nombre. Ce qui pouvait être l'œuvre d'une poignée de savants au XVIII^e siècle devient une production de professionnels qualifiés qui ne sont pas nécessairement capables d'y apporter les mêmes raffinements.
- 38 Mais le problème le plus sérieux posé par la carte d'état-major avait ses racines dans le choix du système de projection. La projection de Bonne est une projection équivalente. Elle conserve donc le rapport des surfaces représentées, mais au détriment de la préservation des angles. Ce défaut, peu sensible au voisinage du méridien de référence (en l'occurrence le méridien de Paris), s'accroît sensiblement à mesure qu'on s'en éloigne (on a par exemple observé une déviation de 3 décigrades à la longitude de 5 grades)⁶⁷. Dans la majorité des applications, cet inconvénient a peu de conséquences. Les problèmes sont apparus principalement avec la guerre de 1914. Les progrès de l'artillerie et la guerre de position amenaient les batteries à viser des objectifs hors de portée de vue, désignés par leur position sur la carte. Une bonne partie du front était fixée dans l'Est du pays, où justement les écarts angulaires sont assez sensibles. La difficulté pouvait être contournée par le recours à des systèmes locaux, ou en employant des projections décalées par fuseaux. Dans tous les cas, l'absence d'un système unifié était source de complications. C'est ce qui détermina l'adoption d'un système de projection conforme, qui permettait de conserver les angles. Le Lambert dit « Nord de guerre », centré spécialement sur le Nord-Est de la France, servit de transition entre la carte d'état-major et la nouvelle carte de France au 1/50 000, dite « type 1922 »⁶⁸, appuyée sur une nouvelle triangulation⁶⁹, avec comme référence l'ellipsoïde de Clarke 1880, et projetée selon trois cônes pour la France continentale plus un cône pour la Corse. Ces caractéristiques sont déjà celles de la carte IGN telle qu'elle a subsisté jusqu'à la fin du XX^e siècle.

Automatisation et numérisation de la cartographie

- 39 Fondamentalement, entre le XVIII^e siècle et le milieu du XX^e siècle, il existe une assez grande continuité dans les techniques cartographiques. Les instruments se perfectionnent et deviennent plus précis, les outils mathématiques s'affinent, mais il s'agit toujours de mesurer des angles et des distances sur le terrain, de calculer leur équivalent dans un système de coordonnées précis, et d'en proposer une représentation

plane. Vers les années 1920, la photogrammétrie aérienne est l'innovation la plus importante en cartographie pour la première moitié du xx^e siècle. Quoiqu'en apparence, l'usage des photographies aériennes, en réintroduisant le paysage, puisse sembler éloigner un peu la carte de l'univers des mathématiques où les progrès de la géodésie l'avaient si profondément ancrée, ce n'est en pratique guère le cas. La photographie aérienne épargne une partie du travail de terrain, simplifie et améliore le report des détails et le rendu du relief, mais elle laisse entier le travail géodésique et entraîne de nouveaux calculs pour établir une correspondance entre la géométrie de l'image et celle de la carte projetée. La photographie a modifié en profondeur la chaîne de production cartographique, mais n'a pas sensiblement affecté la nature des cartes⁷⁰.

- 40 Le cas de l'imagerie spatiale est assez différent. Apparue beaucoup plus récemment, sa résolution longtemps limitée n'en a pas fait *a priori* une source exploitable pour la cartographie à grande échelle. Les images d'une résolution suffisante pour être exploitables en cartographie ont longtemps été l'apanage des militaires, particulièrement américains, et ne pouvaient devenir une source pour la cartographie ordinaire qu'au prix d'une gestion de la chaîne du secret très complexe⁷¹. Les capacités actuelles des satellites en font en principe des sources utilisables en cartographie, sans qu'ils se substituent entièrement à l'imagerie aérienne. Ils sont utiles dans les zones peu accessibles des pays très vastes, comme le Grand Nord canadien. L'observation depuis l'espace par radar fournit des données d'altimétrie avec une bonne résolution spatiale sur de vastes zones, mais qui ne peuvent se substituer à un nivellement de précision pour la cartographie à grande échelle car elles peuvent localement présenter des erreurs. Les satellites d'observation de la Terre n'ont pas modifié fondamentalement la technique cartographique, mais ils ont transformé la maîtrise que les États ont de leur propre cartographie⁷².
- 41 Les satellites, en revanche, ont beaucoup apporté à la géodésie et aux techniques de localisation. On sait depuis le $xviii^e$ siècle que la forme de la Terre est liée aux lois de la gravitation (théorème de Clairaut, qui supposait une terre homogène), et parallèlement aux mesures des méridiennes des $xviii^e$ et xix^e siècle, on procédait systématiquement à des mesures des variations de la gravité au moyen de pendules. Les satellites artificiels offrent un moyen d'observer de manière très complète les variations spatiales de la gravité, et d'avoir par là des informations sur l'irrégularité de la forme de la Terre. La trajectoire d'un satellite est en effet directement soumise aux variations de la gravité. L'intérêt pour la connaissance précise de ces variations a été renouvelé à la fois pour affiner les calculs de trajectoire et en raison de la généralisation de l'utilisation des satellites pour les applications de localisation. Des méthodes puissantes ont été élaborées pour déduire le géoïde (la forme du globe) des variations de la gravitation, à la fois grâce à des avancées théoriques et grâce à la puissance de calcul des machines. Des missions de satellites scientifiques sont spécialement dédiées à l'étude du champ gravitationnel, Notamment la mission GOCE (pour Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer), dont les résultats publiés en 2011 ont donné lieu à une certaine médiatisation⁷³.
- 42 Une des applications les plus spectaculaires des techniques spatiales à la géographie est le GPS. Quoique cette technique, qui a connu une diffusion extrêmement rapide, soit aujourd'hui assez familière, il n'est pas inutile d'en rappeler les principales caractéristiques, tant elle est importante dans le processus de numérisation de l'espace. La localisation par satellite remonte aux années 1960 et au système américain Transit,

ou NNSS, initialement destiné à fournir aux sous-marins nucléaires lanceurs d'engins un moyen de connaître leur position de façon suffisamment précise pour procéder à un tir. Le principe de Transit reposait sur la mesure de l'effet Doppler sur le signal d'une série de satellites dont les orbites étaient connues. Transit est entré en service dans la marine américaine en 1964, et son usage a été étendu au domaine civil en 1967. Le coût des récepteurs et des moyens de calcul associés les a dans un premier temps réservés à quelques applications critiques (plates-formes pétrolières, supertankers), mais les derniers modèles ont pu équiper même des navires de plaisance⁷⁴. Le système a compté jusqu'à six satellites en service, et le délai entre deux mesures à une station donnée, en fonction du passage des satellites au-dessus de l'horizon, était de 35 à 100 minutes, avec une précision comprise entre 15 et 100 m. Il était possible d'obtenir une précision supérieure en multipliant les mesures sur une station fixe, ce qui a conduit à utiliser le système pour des applications de levées topographiques. Le service a été interrompu en 1996. Le système Tskikada, ou Cicada, opérationnel à partir de 1974, est l'équivalent russe, à vocation essentiellement militaire⁷⁵. D'autres applications de localisation utilisant des satellites disponibles pour le public sont les systèmes comme Argos et Cospas-SarSat, surtout destinés au secours d'urgence en mer ou en cas de catastrophe aérienne. Les deux systèmes, assez similaires dans leur conception, reposent sur des balises émettrices. Leur signal est capté par des satellites, et une analyse de l'effet Doppler, qui donne la direction d'émission, permet de calculer une position. Celle-ci est ensuite transmise à des stations de réception au sol. Dans leur principe, ces systèmes sont comparables à Transit, mais, sauf dans les systèmes récents complétés par le GPS, les utilisateurs n'ont pas connaissance de leur position, qui est recueillie par les stations de réception.

- 43 Le système GPS est le successeur de Transit. Il partage avec son prédécesseur le fait de fonctionner avec des récepteurs passifs. Ce point est particulièrement important pour des utilisateurs militaires qui ne veulent pas dévoiler leur position en émettant un signal. Ce type de système a en outre l'avantage de ne pas limiter le nombre des utilisateurs, contrairement aux systèmes actifs où il est théoriquement possible de saturer les capacités de traitement des satellites récepteurs. Le GPS n'utilise pas l'effet Doppler, mais une triangulation sur le signal d'au moins trois satellites (en pratique un minimum de 4 est ordinairement nécessaire) dont la position est connue. En comparant la différence entre un signal temporel émis par le satellite et une horloge de référence on peut calculer la distance entre le récepteur et le satellite. L'opération, répétée sur plusieurs satellites, permet de trianguler la position du récepteur. Il faut un minimum de 24 satellites pour assurer une couverture globale permanente. Une trentaine sont en orbite, afin d'augmenter les chances de pouvoir utiliser le système dans des régions de montagnes où la réception est souvent bloquée par le relief. Le système GPS est à tous points de vue plus complexe que le système Transit : il utilise beaucoup plus de satellites, ses signaux contiennent plus d'informations et leur traitement est plus raffiné (chaque récepteur doit traiter simultanément plusieurs signaux). Simple dans son principe, le GPS ne l'est pas dans sa mise en œuvre. La précision requise dans la mesure du temps est extrême, et les corrections d'erreurs sont multiples et subtiles : effets de l'ionosphère, des réflexions d'ondes, effets de la relativité⁷⁶. Ce sont les progrès de l'informatique qui ont rendu possible la mise en service du GPS et permis sa très large diffusion. Par rapport à Transit, le GPS offre l'avantage d'une mesure instantanément disponible et fiable même si le récepteur est en mouvement. Il est donc plus adapté aux applications de navigation. Sa précision est variable selon le type de

récepteur, le lieu et le mode d'utilisation, mais en pratique, la localisation est généralement exacte à quelques mètres près. En employant deux récepteurs distants l'un de l'autre, on peut obtenir une précision relative de l'ordre du centimètre, utilisable pour des levées topographiques.

- 44 La localisation par satellite marque une rupture importante dans les techniques de localisation. Certes, on calcule une position en fonction d'une mesure de décalage temporel, comme pour un calcul de longitude, mais l'analogie s'arrête là. Le GPS, comme d'ailleurs son prédécesseur Transit, se localise avant tout dans un espace à trois dimensions indépendant d'un référentiel terrestre. Les coordonnées calculées doivent ensuite être converties en coordonnées géographiques pour être transmises à l'utilisateur ou reportées sur une carte. C'est une source d'erreurs potentiellement importantes, surtout dans le cas où le GPS n'intègre pas de dispositif d'affichage cartographique et que les coordonnées sont utilisées par exemple avec une carte papier. En 1986, alors que le système Transit commençait à être assez largement employé, le titre d'un article du *Journal of Navigation* exprimait ces difficultés de façon imagée : « Les systèmes de coordonnées : comment connaître votre position de façon très précise et complètement erronée »⁷⁷. Les cartographies nationales sont fondées sur des systèmes de coordonnées particuliers. Les cartes portent souvent au moins un double système de coordonnées. Un système de coordonnées géographiques (en mesures angulaires), correspondant au référentiel utilisé lors des levées, et un système de coordonnées cartographiques (en coordonnées cartésiennes), des coordonnées planes, généralement exprimées en kilomètres, correspondant au résultat de la projection des coordonnées géographiques dans le système de la carte. Ces coordonnées sont liées à un ellipsoïde particulier, souvent local, et, dans le cas des coordonnées cartographiques, dépendantes d'un système de projection. La transposition de coordonnées d'un système à l'autre est un calcul souvent assez complexe, qui dans certains cas peut nécessiter le passage par un système de coordonnées intermédiaire. Le report direct de coordonnées importées d'un système dans un autre peut se traduire par des erreurs de localisation de dizaines ou de centaines de mètres dans le cas de coordonnées géographiques de même unité et ayant le même méridien origine, et de nombreux kilomètres dans le cas de coordonnées cartographiques dont les origines peuvent être très éloignées. Au mieux, il y a un risque de confusion ; au pire, les coordonnées fournies par un GPS peuvent se révéler inutilisables avec certaines cartes. Dans le petit milieu des gros utilisateurs de données géographiques, pendant les années qui ont suivi l'introduction du GPS, de nombreuses anecdotes s'échangeaient sur les conséquences plus ou moins désastreuses d'utilisation de mauvais systèmes de coordonnées⁷⁸.
- 45 Les coordonnées tridimensionnelles calculées par le GPS pourraient en théorie être transposées dans un repère géographique quelconque, mais les mesures de position sont liées à un modèle gravitationnel précis, et il est plus cohérent d'utiliser un système géodésique dont l'ellipsoïde soit compatible avec ce modèle gravitationnel.
- 46 Cet ellipsoïde est celui du World Geodetic System (WGS) 84. L'idée d'un ellipsoïde global est assez ancienne, et les propositions dans ce domaine n'ont pas manqué depuis au moins le début du ^{xx}e siècle. Ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale et l'apparition des missiles balistiques à moyenne et longue portée que la définition d'un ellipsoïde global apparaît comme un enjeu stratégique⁷⁹. Un ellipsoïde global, ou ellipsoïde géocentrique, par définition, n'a pas de point de référence mais est fondé sur

une connaissance des variations de la gravité. Les progrès de la géodésie dans la deuxième moitié du ^{xx}e siècle, en particulier grâce aux données recueillies avec le système Transit, ont beaucoup amélioré la connaissance de la forme de la Terre. Le WGS 84, défini dans les années 1980 et périodiquement révisé depuis, est le résultat de ces avancées. C'est le système associé au GPS. Son méridien origine est le méridien origine international, parfois appelé méridien origine IERS pour International Earth Rotation and Reference Systems Service, situé à une centaine de mètres à l'est du méridien de Greenwich à la latitude de l'Observatoire⁸⁰. Les coordonnées géographiques fournies par un GPS, sauf conversion, sont référées au système WGS 84. L'usage des coordonnées cartographiques est moins commun, mais le système cartographique le plus ordinairement associé au WGS 84 est l'Universal Transverse Mercator (UTM), une projection sur 6 fuseaux de 6 degrés de longitude, centrés sur un méridien (ainsi la France est couverte par les fuseaux 30, 31 et 32), système standard pour l'armée américaine et l'OTAN. Les premiers GPS disponibles sur le marché se contentaient d'afficher des coordonnées et ne disposaient pas de système d'affichage cartographique, ce qui a causé une grande confusion chez les utilisateurs. Les GPS actuels, du moins les modèles grand public, ont pratiquement tous un affichage cartographique, si bien que le problème est moins aigu. En France, l'IGN a changé son système de référence en 2000, en adoptant un nouveau référentiel français, dit RGF 93, compatible avec le référentiel européen ETRS 89, qui correspond à une adaptation à l'Europe de WGS 84. L'ellipsoïde est le même, mais le repère n'est pas affecté par le mouvement des plaques tectoniques, le méridien origine est le méridien international à la date de 1989. Ce référentiel est progressivement adopté par les services cartographiques des différents pays d'Europe. Le nouveau système de coordonnées s'accompagne d'une nouvelle projection, le Lambert 93, construite sur un cône unique. Comme ce choix induit des altérations linéaires non négligeables, l'IGN prévoit la possibilité d'utiliser une projection conique conforme à 9 zones, mais ne fournit les données nécessaires que sur demande. Cette transition pose des problèmes aux utilisateurs qui ont des gros volumes de données dans les anciens systèmes. Traditionnellement, le problème de la définition du référentiel était plutôt le souci des producteurs de cartes. Le GPS en fait une préoccupation des utilisateurs.

Les cartes et l'ordinateur

- 47 L'outil informatique a profondément modifié non seulement la production et la diffusion des cartes, mais aussi leur nature. L'automatisation du calcul a rendu de grands services à la géodésie. Les calculs fastidieux de compensation ou de transformation de référentiel, qui nécessitaient l'usage de tables laborieusement compilées, peuvent s'effectuer avec une rapidité et un degré de précision difficiles à atteindre sans le recours à l'électronique. Mais ces premiers usages du calcul automatique se substituent simplement au calcul manuel sans changer la nature des cartes. Il n'en va pas de même du traitement informatique des données géographiques elles-mêmes. La possibilité de stocker et de manipuler automatiquement les objets géographiques par ordinateur ouvre une nouvelle ère de la cartographie.
- 48 L'informatisation de la géographie a pris deux voies initialement assez distinctes : le traitement des images spatiales et les systèmes d'information géographiques. Les images spatiales n'ont pas été massivement utilisées en cartographie, mais elles ont été

parmi les premières données géographiques à faire systématiquement l'objet d'un traitement automatique. À ce titre, elles ont contribué à l'informatisation de la géographie. Les photographies sur film des années 1960 prises depuis les capsules Apollo et Gemini ont suscité un intérêt pour l'observation de la Terre depuis l'espace à des fins civiles⁸¹. Ces images, par leurs qualités esthétiques et leur richesse, ont aidé à lever les réticences des militaires américains à permettre que les civils aient un accès à des données spatiales. Le président Johnson et le Congrès étaient favorables au lancement d'un programme civil d'observation de la Terre depuis l'espace⁸². Ce programme a débouché en 1972 sur le lancement d'un premier satellite civil d'observation de la Terre, ERTS-1, renommé par la suite Landsat-1. ERTS-1 était équipé de plusieurs instruments, dont le principal était le radiomètre multispectral MSS (Multi Spectral Scanner). Le MSS mesurait par balayage le rayonnement réfléchi par le sol dans 4 longueurs d'onde, 2 dans le domaine visible (rouge et vert), et 2 dans le proche infrarouge⁸³. Ces mesures étaient rassemblées dans des scènes de 185 km de côté, avec une résolution spatiale d'une soixantaine de mètres. Ces mesures étaient livrées aux utilisateurs sur bande magnétique, encodées sur 7 ou 6 bits, selon les canaux (il était aussi possible de les commander sous formes d'images sur papier). Le choix des bandes spectrales observées était favorable à l'étude de la végétation. ERTS-1 et ses successeurs (6 satellites placés sur orbite) ont été très utilisés par les spécialistes des sciences de la Terre. Le satellite a été pour beaucoup dans la banalisation de l'emploi de l'ordinateur dans la géographie, en particulier dans les universités et centres de recherche. En France, Fernand Verger en a été l'un des pionniers⁸⁴. Avec la télédétection, en même temps que les techniques numériques, une (petite) communauté d'utilisateurs découvre quelques-unes des questions de géométrie sphérique et de projection qui ne préoccupaient naguère que le monde des cartographes professionnels.

- 49 Le traitement des données des premiers satellites d'observation de la Terre se heurte à la relative rareté des ordinateurs, à leurs capacités graphiques limitées ou inexistantes (certains pionniers, faute d'avoir accès à un traceur, impriment des cartes sur des imprimantes alphanumériques en jouant sur la plus ou moins grande densité de chaque caractère), et à la lourdeur des interfaces (aux premiers temps de la télédétection, les cartes perforées n'ont pas encore totalement disparu). À mesure de la diffusion des moyens informatiques, et en particulier avec l'apparition des micro-ordinateurs, la télédétection devient la première technique à employer massivement l'ordinateur dans la géographie universitaire. Elle séduit par la fascination qu'exercent à la fois l'informatique et le satellite, qui, notamment dans la tradition universitaire française, teintent de scientificité une discipline plutôt ancrée du côté des humanités.
- 50 L'autre grande voie par laquelle l'informatique a conquis la géographie⁸⁵ est celle des systèmes d'information géographique (SIG). Au sens strict, un SIG est une base de données informatisée qui comprend des objets géographiques, associée à un système d'interrogation qui permet généralement d'en extraire des cartes. Un cadastre informatisé, un inventaire forestier, un système de gestion de flotte de véhicules sont des exemples de SIG. Il s'agit aujourd'hui d'une industrie importante, avec des éditeurs de logiciels, des marchands de données, etc. L'usage tend à réserver le terme de SIG aux applications professionnelles utilisées dans les services ou à des fins de recherches, mais l'apparition de nombreuses applications géographiques grand public comme les GPS de navigation ou les terres virtuelles en ligne du type Google Earth ont brouillé les

frontières. Les interfaces d'un SIG professionnel et de Google Earth sont très différentes, mais les techniques mises en œuvre ne sont pas très éloignées.

- 51 L'histoire des SIG reste en partie à écrire. Les premiers systèmes civils ont probablement été mis au point dans des universités ou des administrations qui n'ont pas nécessairement constitué d'archives⁸⁶. Le système canadien d'information géographique, constitué dans les années 1960, est souvent cité comme le premier SIG. Jusqu'aux années 1980, les SIG restent à un stade expérimental. Des institutions ou des laboratoires développent des applications plus ou moins perfectionnées de cartographie automatique, ou adaptent des systèmes de bases de données pour pouvoir manipuler des coordonnées. Ces SIG de première génération ont souvent disparu sans laisser de trace lorsque leur financement s'est tari ou quand la personne qui les avait conçus ou qui les maintenait a changé de fonction. De grandes administrations, en particulier en Amérique du Nord, intègrent dans leur informatique des éléments de géographie sous diverses formes. Hors d'Amérique, le service cartographique national britannique (Ordnance Survey) avait commencé une expérience de numérisation de sa cartographie à grande échelle dès 1973.
- 52 Les SIG se développent véritablement à partir des années 1980, avec l'apparition de systèmes commerciaux (Arc/info en 1982⁸⁷, Mapinfo en 1986). Les premiers systèmes sont très coûteux, à la fois en raison du prix des licences des logiciels et de celui du matériel (mini-ordinateur dans le cas d'Arc/info). Les logiciels commerciaux unifient les principes de fonctionnement, et malgré des formats de données incompatibles, la façon de stocker les objets géographiques se standardise : tout se réduit en points, segments et polygones définis par des coordonnées (en général de type géographique) et décrits par des attributs stockés dans des tables séparées. Les logiciels capables de manipuler des objets géographiques sous forme de grille (raster) étaient plus courants, du fait des applications liées à la télédétection. Ces rasters correspondent le plus souvent à des images aériennes ou spatiales, mais ils peuvent aussi représenter des mesures altimétriques, ou toute autre donnée mesurable en continu. Les objets peuvent être organisés en couches et les requêtes adressées à la base acceptent un certain nombre d'opérateurs spatiaux.
- 53 Cette organisation des données, issue en partie de recherches théoriques sur la topologie, est destinée à rendre les objets géographiques aisément manipulables par la machine. Elle est très bien appropriée pour manipuler des tracés issus de cartes topographiques construites dans la tradition mathématique évoquée plus haut, mais elle est aussi un cadre très contraignant pour l'intégration dans ces systèmes de données géographiques de toute nature.
- 54 Les SIG connaissent un développement considérable à partir du moment où le prix des systèmes devient plus abordable, où les données sont plus largement disponibles et où les interfaces se simplifient. Un des premiers logiciels largement disponibles, Arc/info, était destiné d'abord à être utilisé sur des mini-ordinateurs, puis sur des stations de travail (type Sun) relativement coûteuses. Le coût de la licence était élevé⁸⁸. Son interface était exclusivement en ligne de commande, l'investissement en temps pour maîtriser le logiciel était considérable, et en pratique, l'utilisation de ce système nécessitait souvent l'emploi d'un ingénieur à plein temps. Par comparaison, Mapinfo, apparu 4 ans plus tard, fonctionnait sur un PC. La micro-informatique et les interfaces graphiques qui se généralisent dans les années 1990 contribuent à la diffusion des SIG. En 1991, un répertoire recensait déjà 371 applications commerciales assimilables à des

SIG⁸⁹. Il en va de la manipulation des données géographiques comme de tant d'autres domaines à la même époque : l'ordinateur se substitue petit à petit à tous les autres outils. Parallèlement aux progrès des SIG, c'est toute la chaîne cartographique qui s'informatise ; en quelques années, les tables à dessin disparaissent des ateliers de cartographies pour être remplacées par des ordinateurs individuels.

- 55 L'informatisation de la géographie touche successivement tous les utilisateurs, des professionnels au grand public en passant par le monde de l'université et de la recherche. Les premiers utilisateurs de SIG ont été les militaires, les grandes administrations, surtout nord-américaines, et les services cartographiques. Ces secteurs, et notamment le premier, sont encore aujourd'hui de gros utilisateurs de SIG et les principaux clients des systèmes les plus coûteux. Tous les métiers qui produisent ou utilisent de la cartographie recourent à l'informatique, mais les SIG ne sont nécessaires en théorie que pour les utilisateurs qui manipulent de l'information géoréférencée. Le zèle des commerciaux peut cependant, à la faveur d'une information incomplète des clients, amener à employer des SIG dans des situations où des solutions plus légères auraient mieux fait l'affaire, par exemple pour de la cartographie statistique.
- 56 Les rapports entre la géographie universitaire et les SIG sont complexes. Jusqu'à l'apparition de la télédétection et des SIG, la géographie en tant que discipline était restée assez étrangère à la mathématisation de l'appréhension de l'espace. Les progrès de la cartographie mathématique, dont, du reste, bon nombre sont antérieurs à la constitution formelle de la géographie comme discipline académique, ont été le fait avant tout de physiciens et de mathématiciens. Les géographes du corps des ingénieurs géographes étaient des polytechniciens, comme, plus tard, un grand nombre de cadres de l'IGN. La géographie universitaire, en revanche, a contribué au développement des SIG. La géographie quantitative anglaise et américaine des années 1960 a posé un certain nombre des bases conceptuelles des futurs SIG, par exemple la décomposition de l'espace en objets élémentaires. Elle a aussi, indirectement, préparé une génération de géographes à accueillir de nouvelles techniques numériques en introduisant des mathématiques dans leur formation. Quelques géographes quantitativistes emploient l'informatique dès les années 1970⁹⁰, mais c'est surtout la télédétection qui introduit cet outil chez les géographes. Cela explique que quelques-unes des expérimentations sur les SIG aient eu lieu dans la communauté des géographes universitaires⁹¹, même si les précurseurs ont plutôt été dans le milieu de l'administration ou de l'armée.
- 57 Les SIG se sont imposés dans la deuxième moitié des années 1980 et les années 1990, d'abord en Amérique du Nord, puis en Europe. Il était encore possible, au début des années 1990, d'atteindre la quatrième année d'études supérieures en géographie sans avoir entendu parler de système d'information géographique. Pourtant, les SIG commencent alors à se diffuser dans les universités. En Amérique du Nord, la science de l'information géographique devient une branche structurée de la géographie, avec ses revues savantes spécialisées comme l'*International Journal of Geographical Information Systems* (aujourd'hui *International Journal of Geographical Information Science*), créé en 1987. Certaines revues anciennes consacrées à la cartographie, comme *Cartographica*, s'ouvrent aux recherches sur les SIG.
- 58 La communauté des spécialistes de SIG se compose de chercheurs venus de l'analyse spatiale (c'est le cas de M. Goodchild, l'un des spécialistes le plus connus du domaine), de spécialistes de télédétection, rejoints par de jeunes universitaires séduits par l'outil.

La cohabitation était (et demeure) parfois difficile avec les géographes traditionnels, mais plus encore avec les géographes critiques inspirés par les divers courants de la postmodernité, pour des raisons épistémologiques⁹², politiques, et en raison de la concurrence pour les postes et les crédits.

- 59 En France, la diffusion des SIG dans l'université est plus tardive. Les spécialistes de géographie quantitative et de télédétection s'y intéressent, mais, si la télédétection peut souvent bénéficier des moyens de laboratoires de sciences exactes, vers la fin des années 1980, peu de départements de géographie ont eu les moyens de financer l'équipement en matériel et en logiciel, sans compter l'acquisition des données. Au mieux, les SIG restent alors cantonnés au troisième cycle. Il existait, au milieu des années 1990, une recherche française assez dynamique autour des SIG et de ce qu'on commençait à appeler globalement la géomatique, mais c'est plutôt par le biais de l'enseignement que les SIG se sont généralisés à l'université, dans les années 2000. Les applications des SIG s'étant multipliées dans de nombreux métiers, dont ceux de l'aménagement, un des débouchés traditionnels des étudiants en géographie, toutes les formations intègrent progressivement au moins une initiation aux SIG. La baisse du prix du matériel informatique et la possibilité de négocier auprès des éditeurs des tarifs pédagogiques pour les licences de logiciels facilitent la mise en place de ces enseignements. Ainsi, le faible nombre initial de spécialistes de SIG en France et la façon particulière dont ces techniques se sont imposées à l'université expliquent qu'elles n'aient pas suscité ici les mêmes débats qu'aux États-Unis.
- 60 Hors du monde professionnel et universitaire, il est assez probable que les mots « systèmes d'information géographique » n'évoquent pas grand-chose. Pourtant, les techniques issues des SIG ont colonisé l'environnement quotidien. Les GPS de navigation qui équipent les véhicules ou qui sont disponibles sur les smartphones, de même que les terres virtuelles en ligne en sont des exemples. La disponibilité sur internet, le plus souvent gratuitement, de données géographiques et d'outils pour les manipuler (l'API Google Maps, pour ne citer que l'outil le plus courant, qui permet à l'auteur d'un site web de publier des cartes personnalisées en employant l'interface et les données de Google), a encouragé la floraison d'une sorte de géographie d'amateurs. On a parfois appelé « néogéographie » l'ensemble des nouvelles pratiques cartographiques des personnes *a priori* étrangères au monde de la géographie professionnelle. Ces pratiques recouvrent un éventail extrêmement large, des plus simples cartes de localisation à des pratiques artistiques très élaborées utilisant la cartographie⁹³.
- 61 Une des conséquences majeures de la banalisation des techniques liées au SIG est la substitution de l'écran au papier comme support privilégié de la carte. Cette substitution n'est pas complète, mais elle est fort étendue, à la fois dans les usages professionnels et auprès du grand public. Par exemple, chez ces grands utilisateurs de cartes que sont les militaires, la carte papier, appréciée pour sa légèreté, son faible coût et sa robustesse reste employée sur le terrain, mais elle est concurrencée par les SIG dans les postes de commandement, pour les préparations de mission⁹⁴, etc. Il en va de même, à des degrés divers, chez les autres catégories d'utilisateurs ; la carte papier ne disparaît pas, car, outre ses mérites propres, elle constitue souvent l'essentiel du patrimoine cartographique existant, mais elle est presque toujours complétée, et, dans certains usages, supplantée, par son équivalent sur écran. C'est aussi le cas auprès du grand public. Beaucoup d'automobilistes se fient à leur GPS au point de négliger de se

munir d'une carte routière, et à la maison ou au bureau, lorsqu'on cherche à vérifier une localisation, le réflexe premier est plutôt de se connecter à l'internet que de sortir l'atlas.

- 62 Le passage de la carte papier à la carte sur écran n'est pas un simple changement du support. La différence la plus évidente est la fluidité de la carte sur écran qui se prête à tous les changements d'échelle, choix d'affichage, mises à jour plus ou moins instantanée, etc. Un autre point moins souvent souligné et pourtant d'une grande importance est la différence de qualité graphique entre la carte traditionnelle et la carte issue de SIG⁹⁵. Indépendamment des capacités graphiques de plus en plus impressionnantes de machines, la carte issue de SIG est presque toujours moins satisfaisante, visuellement, que la carte papier traditionnelle. Le chevelu hydrographique est souvent disgracieux, en raison d'une épaisseur de trait trop uniforme ; à certaines échelles, le détail des réseaux viaires est inapproprié et donne une image ou trop confuse ou trop pauvre ; le placement des toponymes et des autres indications textuelles est maladroit, etc. Ces défauts sont la conséquence inévitable du processus automatique de production de la carte. Quelles que soient les bases mathématiques rigoureuses de la carte à grande échelle traditionnelle, la dernière étape de la production suppose l'intervention d'un dessinateur capable de choix esthétiques. Par exemple, sur la carte topographique française, le placement des ombrages qui soulignent les pentes, rigoureux en apparence, requiert en réalité, pour être utile, un discernement hors de portée d'une machine. L'une des opérations les plus difficiles à automatiser est la généralisation, c'est-à-dire l'ensemble des compromis avec la rigueur géométrique nécessaires à l'expression claire de la carte en fonction de l'échelle du dessin : déplacer un bâtiment pour tenir compte de l'épaisseur du trait qui figure une route, supprimer un lacet, etc. Les recherches sur la généralisation automatique n'ont jusqu'à présent pas abouti à des résultats très probants, aussi les systèmes cartographiques qui proposent une grande amplitude d'échelles d'affichage reposent-ils souvent sur des techniques de gestion du niveau de détails qui combinent l'usage de jeux de données différents selon les échelles et de filtres qui suppriment automatiquement certains détails aux petites échelles. Mais ces techniques ne sont pas toujours efficaces lorsqu'il est possible de changer d'échelle en continu.
- 63 Ces considérations esthétiques sont plus importantes qu'on ne pourrait le penser. Sans doute les progrès de la généralisation automatique pourront-ils améliorer (du point de vue d'utilisateurs habitués à la carte traditionnelle) l'aspect des cartes sur écran. Pourtant, il est probable que les caractéristiques graphiques des cartes des GPS ou des cartes de Google Maps et des autres services de cartographie en ligne nous heurtent déjà moins que lors de leur apparition. Pour les générations dont le premier contact avec les cartes aura été ces cartes issues de SIG, l'aspect choquant aura tout à fait disparu. Ces nouvelles cartes modifient la norme de l'esthétique cartographique.
- 64 Chaque époque de la cartographie invente son esthétique qui exprime quelque chose de la fonction pratique, mais aussi symbolique, assignée à la carte. Quelques hypothèses sur l'esthétique des cartes numériques actuelles seront explorées dans la partie III.
- 65 L'informatisation est la dernière étape en date de la mathématisation de la cartographie. Ces transformations techniques sont liées à des changements d'usage et de statut de la carte. À mesure que sa précision s'accroît, la cartographie requiert la mise en œuvre de systèmes techniques de plus en plus complexes, qui ne peuvent exister que grâce à des États puissants et centralisés. Dans la partie suivante, nous

proposons de replacer ces évolutions techniques dans leur cadre politique, en montrant comment la carte, initialement surtout une curiosité du cabinet des savants, devient à l'époque moderne le symbole et l'instrument de la puissance des États. Nous verrons en particulier comment les militaires, surtout à partir du XIX^e siècle, prennent le pouvoir sur la cartographie, dont ils déterminent les principales évolutions, jusqu'aux techniques géonumériques actuelles.

NOTES

1. [Andrews, 2009] peut constituer une introduction pour l'histoire des techniques cartographiques jusqu'au XIX^e siècle. La référence pour l'histoire de la cartographie est le projet de l'université de Chicago, dont six tomes couvrant les cartographies extra-européennes et la cartographie européenne jusque vers 1700 sont déjà parus. Le volume 1, qui couvre la cartographie jusqu'au Moyen Âge, est déjà un peu ancien au regard des progrès dans l'étude de la cartographie antique. Pour cette période et pour le Moyen Âge, les études réunies par Talbert [2008], permettent d'actualiser certains chapitres aujourd'hui dépassés. [Dueck, 2012] propose une synthèse concise sur la géographie dans l'Antiquité classique. La revue *Imago Mundi* est entièrement consacrée à l'histoire de la cartographie. Le site web de l'histoire de la cartographie permet d'accéder gratuitement au contenu des quatre premiers tomes : < <http://www.geography.wisc.edu/histcart/> >. En français et dans une optique plus grand public, voir également [Hofmann (dir.), 2012].
2. La traduction anglaise annotée des chapitres théoriques proposée en 2000 par J. Lennart Berggren et Alexander Jones (Princeton University Press) est probablement la meilleure introduction à ce texte ardu.
3. [Andrews, 2009, p. 6]
4. Il ne subsiste qu'environ 10 % de cet énorme plan, sous la forme d'un peu plus d'un millier de fragments de marbre qui ont tous été numérisés et sont consultables sur un site dédié de l'université de Stanford où l'on trouvera aussi une bibliographie complète sur le sujet : [En ligne] : < <http://formaurbis.stanford.edu/index.html> >. En français, voir [Davoine, 2007].
5. Une version numérique de la carte est visible à l'adresse suivante : [en ligne] : < <http://peutinger.atlantides.org/map-a/> >.
6. [Talbert, 2010].
7. [Nicolet, 1996].
8. [Histoires, V-47].
9. *Thésée*, I-1 : [...] ἐν ταῖς γεωγραφίαις [...] οἱ ἱστορικοὶ τὰ διαφεύγοντα τὴν γνῶσιν αὐτῶν τοῖς ἐσχάτοις μέρεσι τῶν πινάκων πιεζοῦντες, αἰτίας παραγράφουσι ὅτι 'τὰ δ' ἐπέκεινα θῆνες ἄνυδροι καὶ θηριώδεις'...Traduit par Amyot (édition de 1567) : « [...] les historiens qui décrivent la terre en figure [...] ont accoutumé de supprimer aux extrémités de leurs cartes, les régions dont ils n'ont point connaissance, et en cotter

quelques telles raisons par endroits de la marge : “outre ces pays ici il n'y a plus que profondes sablonnières sans eau, pleines de bêtes venimeuses”...

10. III-17 : « *Agrippam quidem in tanta viri diligentia praeterque in hoc opere cura, cum orbem terrarum orbi spectandum propositurus esset, errasse quis credat et cum eo divum augustum is namque complexam eum porticum ex destinatione et commentariis m. agrippae a sorore eius inchoatam peregit.* » Extrait de la traduction d'Émile Littré. [En ligne] : < <http://remacle.org/bloodwolf/erudits/plineancien/livre3.htm> > : « Qui pourrait penser qu'Agrippa, homme d'une si grande exactitude, et en outre occupé du soin de mettre sous les yeux de l'univers le tableau de l'univers même, se soit trompé comme il a fait, et que cette erreur ait été répétée par le dieu Auguste ? Car ce prince acheva le portique qui devait renfermer ce tableau, et qui avait été commencé par sa sœur, d'après l'intention et les mémoires de M. Agrippa. » On notera qu'Émile Littré, l'auteur de cette traduction, s'abstient d'employer le mot « carte ».

11. Claude Nicolet [1996] consacre un chapitre entier (chapitre 5) à la géographie d'Agrippa, et défend l'idée d'une carte géographique rectangulaire, mais d'autres travaux plus récents sont moins affirmatifs (par exemple [Talbert, 2008]). Dans l'Antiquité tardive, cependant, il existait des représentations en images, à vocation pédagogique, de la géographie du monde romain. Dans son *Discours pour la restauration des écoles*, Eumène, en 298, demande que les portiques des écoles d'Autun soient décorés d'une représentation en image du monde entier, pour montrer « la situation des lieux avec leurs noms, leur étendue, et leurs distances, la source et l'embouchure de tous les fleuves, les sinuosités des rivages et les circuits de la mer qui embrasse les continents », ainsi que des scènes historiques (Eumène, *Oratio pro instaurandis scholis*, XX-XXI, traduction J.-B. Roghet).

12. VI-2-3 : « *Dicaearchi tabuli credidi* », « j'en ai cru les relevés de Dicéarque », traduction de L. A. Constans et Jean Bayet, Les Belles Lettres.

13. Dom. 10.

14. En particulier dans le premier volume de *l'Histoire de la cartographie* de Harley. Voir à ce sujet l'étude de Richard Talbert [2008] et le chapitre rédigé par Kai Brodersen dans [Dueck, 2012].

15. [Arnaud, 1989]. Brodersen [2001, pp. 8-9] notent que Galien, lorsqu'il relate un de ses voyages, prend soin d'en détailler l'itinéraire au bénéfice de ses lecteurs qui souhaiteraient suivre ses pas, mais qu'il est manifeste non seulement qu'il n'avait pas accès à des cartes, mais qu'il n'a apparemment pas envisagé d'en consulter.

16. IV-3-37 : « *cogor et e tabula pictos ediscere mundos, qualis et haec docti sit positura dei* » ; « à force de la lire, je connais à fond la carte des mondes et leurs couleurs et leur position et cette savante ordonnance qui est l'œuvre d'un dieu. » (Traduction D. Paganelli, Les Belles Lettres).

17. I-1-21.

18. [1990, p. 42].

19. *Propos de table*, 7.4.7 ; *στρογγύλη καὶ μόνιμος*, ronde et stable. L'argument cependant ne semble pas définitif. Strabon, à son époque, considérait que la sphéricité de la Terre était connue par le public instruit. Il n'y a pas de raison de penser qu'il n'en va pas de même un siècle et demi plus tard. La comparaison entre la terre et une table de repas dans ce passage de Plutarque intervient dans un contexte qui n'implique pas de s'en tenir à une stricte rigueur scientifique. Le « *στρογγύλη* » employé ici n'a pas de

signification géométrique très précise, puisqu'on peut l'appliquer à toute forme arrondie : bouclier, coque de bateau.

20. [Woodward, 1987, p. 301]. Les mappemondes médiévales pouvaient prendre des formes assez variées, mais ne relevaient pas de la cartographie mathématique.

21. [Arnaud, 1990].

22. [Vagnon, 2002].

23. [Nicolet et Gautier Dalché, 1986].

24. T. P. Wiseman [1992, pp. 22-42], qui consacre une étude aux quatre géomètres de César, conclut à la véracité du récit, et va jusqu'à y voir l'origine des données utilisées pour dresser la carte d'Agrippa.

25. [Ash, 2007, p. 510].

26. Les techniques de navigation médiévales ne sont pas très bien connues dans le détail. Sans doute un grand nombre de pilotes n'avaient-ils pour guides que leurs cartes mentales et l'expérience transmise oralement [Campbell, 1987, p. 387].

27. [Gaspar, 2008].

28. [Andrews, 2009, pp. 15-16].

29. [Woodward, 1990].

30. [Gautier Dalché, 2007, p. 316].

31. [Crosby, 2003].

32. [2007, p. 11].

33. Rien n'indique que le lien ait été fait explicitement à la Renaissance, mais au XVIII^e siècle, les projections cartographiques sont considérées comme des cas particuliers de perspectives.

34. [Snyder, 1997 et 2007].

35. [Snyder, 1997, p. 47].

36. [Lindgren, 2007].

37. Les textes techniques d'Hygin le Gromatique et de Frontin, principaux arpenteurs romains dont les œuvres nous soient parvenus, sont disponibles en édition bilingue latin-français aux Belles Lettres. Comme cette édition est malheureusement dépourvue des illustrations qui accompagnent les manuscrits, on peut préférer se référer au recueil établi par Brian Campbell [2000].

38. [Lindgren, 2007, p. 484].

39. [Levallois, 1988, p. 14].

40. [Gallois, 1909a ; 1909b].

41. Picard a détaillé sa proposition d'unité de mesure dans un mémoire séparé, voir [Levallois, 1988, p. 17]. Les propositions de mesures universelles circulaient dans l'Europe de l'époque. On les trouve notamment exprimées clairement par John Wilkins en 1668. Wilkins examine diverses propositions de mesures universelles faites par d'autres (sans plus de précision), dont celles de fixer l'unité de longueur comme un sous-multiple de la longueur d'un méridien terrestre qu'il écarte comme irréaliste avant de s'arrêter à la mesure de la longueur d'un pendule à seconde. Une idée dont il attribue la paternité à Christopher Wren. Voir [Wilkins, 1668, p. 191], et [Bennet, 2002, p. 50].

42. [Smith, 1997, p. 17].
43. Cité par [Gallois, 1909b, p. 305].
44. Ces techniciens se sont formés rapidement aux techniques modernes de topographie. Dès 1777, les ingénieurs militaires conçoivent un projet de cartographie des régions frontalières terrestres et maritimes distinct de l'entreprise de cartographie civile [Pelletier et Ozanne, 1995, p. 209].
45. Une société de 50 actionnaires se voit concéder l'entreprise cartographique pour une durée de 30 ans contre une rente annuelle de 1 600 livres par souscripteur, éventuellement réduite si les frais de production pouvaient être couverts autrement. Le préambule de l'acte de création de la société précise toutefois que l'association n'a « d'autre objet que l'honneur et les avantages qui en reviendraient à la nation ». Un système de souscription qui proposait d'acquérir par avance l'ensemble des feuilles à un tarif légèrement réduit ne recueille, avec 200 souscripteurs, qu'un succès limité. Le seuil de rentabilité de chaque feuille était de 2 000 exemplaires. Seules les feuilles de la région parisienne ont atteint ce tirage.
46. [Pelletier, 1986].
47. L'écart entre les opérations de levées et la publication des feuilles s'explique par le temps nécessaire aux opérations de vérification, au retard des graveurs, et, plus que tout, par les troubles de l'époque révolutionnaire.
48. [Cassini, 1810, p. 100].
49. [Cassini, *op. cit.*, pp. 105-106].
50. 1 toise = 6 pieds ; 1 pied = 12 pouces, 1 pouce = 12 lignes.
51. [Delambre, 1806, p. 15].
52. Du moins en France. Les topographes britanniques lui ont toujours préféré le théodolite construit par Ramsden à la même époque, ce qui a donné naissance à deux traditions distinctes et rivales dans les instruments de levée.
53. [Levallois, 1988, p. 60].
54. Le mètre avait été adopté une première fois en 1795, avant la fin des mesures, comme une fraction de la toise du Pérou, l'étalon utilisé par Bouguer et La Condamine au milieu du siècle lors de la mesure du méridien à l'équateur. Ce mètre légal provisoire est remplacé en 1799 par son équivalent issu des nouvelles mesures, et matérialisé par un étalon.
55. [Dhombres, 1993].
56. Même si les définitions ultérieures du mètre ne font plus expressément référence à la taille de la Terre, cette référence est implicite puisque toutes ces définitions s'efforcent de produire une mesure très proche de l'étalon d'origine.
57. Voir également [Delambre, 1806, p. 10].
58. An VII, t. 2, p. 112.
59. [Smith, 1997, p. 31].
60. Les chronomètres utilisés en marine n'étaient pas jugés assez fiables pour atteindre la précision requise pour les levées géodésiques. La méthode des satellites de Jupiter ne permet pas non plus d'atteindre une précision absolue. On avait parfois recours aux signaux de feu, qui consistaient à tirer une fusée visible à une centaine de kilomètres à mi-chemin entre deux postes d'observation. La comparaison des heures sidérales au

moment de l'observation donnait l'écart de longitude. En organisant des chaînes d'observateurs et de signaux, il était possible d'utiliser cette méthode sur de longues distances. La précision cependant n'est pas meilleure qu'avec les autres méthodes. L'utilisation du télégraphe électrique, à partir du milieu du XIX^e siècle, a permis de simplifier et d'améliorer les mesures.

61. La plupart des ellipsoïdes locaux sont définis par le nom du modèle de forme terrestre qu'ils utilisent (généralement le nom de son auteur suivi de l'année de publication) et un point de référence, c'est-à-dire un point auquel l'altitude du volume de référence est de zéro.

62. [Smith, 1997, p. 31].

63. [Levallois, 1988, p. 141].

64. [Puissant, 1832], [Peytier, 1853].

65. L'usage a consacré la dénomination « projection de Bonne » pour désigner la projection employée par la carte d'état-major mais les documents officiels de l'époque la désignent toujours sous le nom de « Flamstéed modifiée ». Dans d'autres pays d'Europe, cette projection est connue comme « projection du dépôt de la guerre », du nom de l'administration de rattachement des ingénieurs géographes. Le détail des opérations nécessaires à la projection se trouve dans [Puissant, 1821].

66. [Levallois, 1988, p. 100], incrimine un manque de soin dans les calculs de report des coordonnées sur l'ellipsoïde.

67. [Levallois, 1988, p. 170]. L'usage du méridien de Paris comme origine des longitudes et des grades comme unité de mesure est longtemps resté une curiosité des cartes françaises.

68. Les premières feuilles de la carte au 1/50 000 sont antérieures au type 1922. Cependant, le « type 1900 », prédécesseur du type 1922 pour la métropole, carte en couleurs et en courbes de niveau, était trop complexe et trop coûteuse à produire, surtout en raison du grand nombre de couleurs employées sur chaque feuille.

69. Il n'est pas nécessaire d'entrer dans les détails de cette nouvelle triangulation, destinée à corriger les imperfections de la précédente. Les premiers travaux remontent à 1870, avec la vérification de la méridienne de Delambre. La triangulation de premier ordre (860 sommets) a été achevée en 1957, le réseau de détail (environ 55 000 points), dans les années 1980. Cette triangulation est accompagnée d'un nivellement général.

70. Son impact sur la qualité est délicat à établir. Sans doute, sur des territoires très étendus ou difficiles d'accès, elle a pu améliorer le niveau de détail [Thrower, 2007, p. 173], mais lorsqu'elle se substitue trop au travail de terrain, elle peut aussi être source d'erreurs.

71. [Cloud, 2002] ; voir également la partie II.

72. Voir la partie II.

73. Voir : < http://www.esa.int/esaCP/SEM1AK6UPLG_index_0.html >.

74. [Danchik, 1998].

75. [Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2003, p. 171].

76. [Ashby, 2002].

77. "Coordinate Systems: How to Get Your Position Very Precise and Completely Wrong", [Ashkenazi, 1986].

78. On pense ici en particulier au milieu de la géographie militaire française. Il est malheureusement impossible de corroborer ces récits, où il était parfois question d'erreurs de plusieurs dizaines de kilomètres.

79. Voir la partie II.

80. Cet écart, assez représentatif des problèmes liés à la multiplicité des référentiels, s'explique par la méthode de construction du modèle. Le méridien origine international n'est pas lié à un repère terrestre matériel, si bien que le mouvement des plaques tectoniques modifie sa position relative. La valeur annuelle du déplacement dans la région de Greenwich est de l'ordre de 2,5 cm.

81. [Lowman, 1999].

82. Programme alors appelé EROS, *Earth Resource Observation Satellites*, lancé en 1966, voir [Kramer, 2001, p. 8].

83. La présence de ces canaux infrarouges incitait les utilisateurs qui recomposaient des images à partir de ces données à attribuer la couleur rouge aux canaux infrarouges (conformément à l'apparence des films couleur infrarouge), ce qui entraîna la prolifération d'images satellites en « fausses couleurs » où la végétation apparaissait en rouge sombre.

84. [Verger, 2010].

85. Il faudrait mentionner la géographie quantitative, mais outre que les outils qu'elle utilise ne sont pas spécifiques à la géographie, l'informatique n'y joue pas nécessairement un rôle central. Sur ce courant, voir par exemple, pour le cas français, [Pumain et Robic, 2002], et pour un point de vue un peu plus critique, [Deneux, 2006, pp. 129-136].

86. [Coppock et Rhind, 1991].

87. La société ESRI, éditeur d'Arc/Info, proposait déjà auparavant des outils de traitement de données géographiques, mais Arc/info est le premier SIG complet ; voir [Aronson, 1985].

88. La politique tarifaire de l'éditeur ESRI a toujours été assez opaque. Au milieu des années 1990, le coût d'une licence Arc/info pour station de travail Unix était de 10 000 à 20 000 \$. Le logiciel ArcView, du même éditeur, pour PC, coûtait environ 1 000 \$; le prix d'une licence Mapinfo était du même ordre de grandeur. D'après : < http://www.sgsi.com/miusergroup/mi_v_ai.htm >.

89. [Goodchild, 1995].

90. [Pumain et Robic, 2002].

91. [Aronson, 1985].

92. Sur ces débats, voir la partie III.

93. [Desbois, 2011b]. Il n'est pas certain que ce néologisme soit encore employé dans quelques années.

94. Le déploiement d'un système technique ne signifie pas nécessairement qu'il est adopté. À la fin des années 1990, des pilotes français à qui avait été livré un système informatisé de préparation de mission disaient ainsi préférer se fier aux cartes papier. Ce n'est d'ailleurs pas nécessairement le signe d'une résistance au progrès, car dans le domaine militaire, les enjeux industriels ne coïncident pas toujours avec les impératifs opérationnels.

95. Les spécialistes de SIG insistent sur le fait qu'un SIG n'est pas destiné à produire des cartes. Selon la logique traditionnelle de la production cartographique, le SIG devrait servir à produire le canevas à partir duquel une carte pourrait être dressée, par exemple par un dessinateur spécialisé. Dans les faits, et en particulier dans la cartographie en ligne, les cartes sur écran sont le résultat de requêtes de SIG, à peine habillées de quelques raffinements graphiques ordinairement absents des sorties de SIG professionnels.