

Mesurer l'espace et après ?

Table des matières des présentations

De la mesure au processus métrologique : quelle place pour les géographes face à la mise en données de l'environnement ?

Suzanne Catteau, Laurent Couderchet, Matthieu Noucher2

Projets géographiques, théories et modèles

André Dauphiné, Damienne Provitolo.....9

Faut-il pouvoir mesurer la consommation d'espace pour la réduire ?

Rémi Delattre, Thibault Lecourt - Avignon Université, UMR ESPACE19

Appréhender les dimensions géographiques de l'alerte par diffusion cellulaire en France : une question spatiale, mais pas seulement !

Johnny Douvinet, Esteban Bopp.....22

Intelligence géospatiale maritime et sciences de l'espace géographique : regards croisés

Anne Duverger, Cyril Carré, Cyril Ray, Jean-Marie Kowalski26

Réflexion autour de la géographie théorique et quantitative

Didier Josselin, Guilhem Boulay42

Géographie spontanée ou spatialité ? Une question épistémologique

Sylvie Joublot Ferré, Pierre-Amiel Giraud.....47

Quel(s) futur(s) pour la géomatique à l'heure de la science des données ?

Quid d'une science des données géographiques ?

Boris Mericskay49

Dimension et mesure : horizon des géographes

Geoffrey Mollé.....54

Espace, épidémiologistes et Géographes de la Santé

Sandra Pérez58

Pour un projet théorique en géographie

Denise Pumain.....61

De la mesure au processus métrologique : quelle place pour les géographes face à la mise en données de l'environnement ?

Suzanne Catteau, Laurent Couderchet, Matthieu Noucher

Introduction : étudier *versus* faire

L'adoption des SIG par les géographes dès la fin des années 1980 a marqué la géographie et a été à l'origine de nombreux débats concernant la place de l'outil dans la discipline (Schuurman, 2000). L'appel à communication Géopoint de 2024 témoigne de la persistance de ces questionnements.

Dans la gestion de l'environnement, les SIG occupent une place centrale et sont au cœur de préoccupations pluridisciplinaires. La mise en données des objets environnementaux répond à la fois à des attentes de description de situations, de mesure d'évolutions et d'alerte face aux constats de dégradation. Cette mise en mesure devient la norme : quel que soit le niveau d'action elle est un incontournable dans le diagnostic, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques environnementales, elle impose donc une dimension performative dans la réponse apportée. Le processus de mise en mesure apparaît alors aussi important que la mesure en elle-même.

Cette position de débat propose de décaler le regard : porter l'attention, non plus à la mesure et à l'outil technique uniquement, mais au processus métrologique et au contexte socio-technique dans lequel il s'inscrit. D'autres avant nous l'ont proposé, notamment dans le champ de la cartographie critique. Néanmoins, les postures de nombreux auteurs ont souvent été surplombantes : en s'appuyant sur des cadres théoriques (foucauldien, la plupart du temps), ils ont tenté de révéler les relations de savoir-pouvoir sous-jacentes à la manipulation des outils, via des études de cas observés à distance. C'est ainsi qu'en guise de clôture d'un colloque sur les SIG, organisé à l'Université d'Orléans en 2004, Guy Di Méo suggère : « *Dans une courte conclusion en forme de paradoxe ou de boutade, on pourrait, en définitive, se demander si les savoirs géographiques ne s'enrichissent pas plus de la lecture critique des cartes produites par une multitude de cartographes désormais autonomes, que du fait de leur stricte production par la géographie des géographes* » (2004 : 662).

Notre proposition est ici radicalement différente car nous sommes méfiants vis-à-vis du caractère surplombant et déconnecté de ces lectures à distance des pratiques actuelles de mise en mesure de l'environnement. Au contraire, nous revendiquons une posture qui allie l'observation des pratiques à l'exploration des données, prônant plutôt une approche critique des métrologies environnementales qu'on pourrait qualifier d'incarnée, à partir de nos expériences dans divers contextes de recherche-action. Pour appréhender à la fois le tournant numérique et une forme de routinisation de la cartographie (*everyday cartography*) dans le domaine de l'environnement, nous suggérons un repositionnement des géographes face aux SIG et à ses avatars du géoweb. Afin de sortir de postures spéculatives, nous proposons à la fois des analyses de la fine mécanique des nouveaux modes de fabrication des mesures environnementales et dans le même temps, une observation détaillée des usages effectifs de ces dispositifs. Comme l'explique Mathew Wilson, ce

positionnement qui fait des SIG un objet de recherche, n'est pas simple à tenir sur les campus américains, qui ont tendance à distinguer, voire à séparer, les approches : « *studying* versus *doing* » (Wilson, 2017 : p. 5). Cette même tension est perceptible dans les arènes universitaires françaises. Elle implique pour le chercheur qui travaille au carrefour de la géographie numérique et de la géographie de l'environnement un triple impératif que nous proposons de mettre en débat lors de Géopoint 2024 : celui de mixer les méthodes et de constituer des approches pluridisciplinaires, celui de prendre au sérieux les acteurs et enfin celui d'accompagner les dispositifs SIG pour contenir leur dimension prescriptive. Pour illustrer ces propositions, nous nous appuyons sur différentes expériences de recherche-action qui nous ont placées en immersion, au plus proche des acteurs.

1) Mixer les méthodes et constituer des alliances disciplinaires

Les informations géographiques actuellement mobilisées dans les politiques environnementales résultent de la combinaison de plusieurs technologies et font intervenir une pluralité d'acteurs, qui ne sont pas forcément en interaction les uns avec les autres mais qui interviennent à un moment donné dans le cycle des données géographiques mobilisées dans le processus. De plus, la production de données géographiques s'ouvre désormais aux acteurs non-experts de la géomatique, elle est permise par le développement de logiciels gratuits et faciles d'accès, de plateformes cartographiques mondiales en ligne, issues de l'investissement d'acteurs économiques (GAFAM), et d'une multiplicité de plateformes de géovisualisation, notamment institutionnelles. Pour Dodge et Perkins (2015), ces évolutions complexifient la déconstruction des cartes contemporaines en comparaison à celles antérieures dans lesquelles le processus métrologique, détenu par quelques rares experts était davantage borné. C'est notamment le cas des études de Harley (1989) qui décryptent l'autorité des cartes et leur dimension surplombante.

Cette complexité implique d'inventer de nouvelles approches pour considérer le processus métrologique dans son ensemble et déplacer le regard, de l'outil technique au contexte dans lequel il s'inscrit. Cela peut prendre la forme de fouilles exploratoires de données pour ouvrir les boîtes noires algorithmiques et remonter dans leur généalogie, de suivi de la circulation des représentations numériques des territoires pour décrypter leurs multiples braconnages, de démultiplication de tests SIG, d'entretiens avec les concepteurs et utilisateurs, d'observations participantes pour comprendre les dynamiques collaboratives ou encore d'enquêtes ethnographiques pour incarner les pratiques individuelles. Plusieurs auteurs utilisent l'expression de « *mixed methods* » (Elwood et Cope, 2009 ; Preston et Wilson, 2014).

Pour Mei-Po Kwan (2004), mixer les méthodes participe à la construction d'un lien entre le SIG et les méthodes qualitatives, hybridant ainsi différents courants de la géographie. Cette conception implique un estompage du clivage construit entre une géographie qualitative et quantitative. Cette proposition date de plus d'une vingtaine d'années pourtant elle ne peut pas être décrite comme caractéristique d'une utilisation des SIG par les géographes puisqu'elle n'est pas systématique dans la discipline. Néanmoins, cette manière de mixer les approches apparaît absente des pratiques des utilisateurs et concepteurs des SIG issus des sciences de l'environnement. On pourrait donc interroger la spécificité disciplinaire de cette proposition.

Cette position assumée d'opérer une forme de « bricolage méthodologique » (Di Méo et Buléon, 2005) nécessite alors d'envisager des alliances disciplinaires pour interroger les multiples facettes des dispositifs socio-techniques étudiés. Le rapprochement avec les *critical data studies* est alors l'occasion d'ouvrir le dialogue avec d'autres disciplines, notamment entre géographie, science de l'information géographique, Science & Technology Studies (STS) et informatique pour appréhender les « appareils et éléments technologiques, politiques, sociaux et économiques qui constituent et encadrent la génération, la circulation et le déploiement des données » (Dalton et Thatcher, 2014). Il s'agit d'observer le processus métrologique au prisme des agencements socio-techniques pour éclairer la façon dont les SIG et les données géographiques façonnent les rapports de pouvoir sur leurs différents terrains et comment ils produisent les politiques environnementales.

2) Prendre au sérieux les acteurs

Les approches mixtes nous enjoignent à aller au contact direct des concepteurs et utilisateurs de ces outils numériques. Leur regard critique sur les SIG a été invisibilisé dans les premières études critiques, publiées par et pour des universitaires. Pourtant, ces acteurs mettent souvent en évidence les mêmes conditions structurelles que celles qui ont été théorisées par les critiques du SIG (Noucher, 2023). Nous revendiquons donc un développement des approches critiques auprès de ces « insiders » (Wood, 2015 : p. 16), c'est-à-dire des concepteurs et utilisateurs de ces systèmes. À plusieurs reprises dans nos parcours, nous avons pris ce rôle, par nos positions de doctorant CIFRE, d'agent de bureau d'étude ou de chercheur engagé dans des projets de recherche-action.

Contrairement aux approches critiques théoriques, l'attention aux acteurs qui produisent et utilisent les mesures, permet de concevoir leur propre prise en compte de ces limites. En effet, leurs discours sont émaillés de références et sous-entendus à propos de bricolages conceptuels ou méthodologiques, de questionnements sur les enjeux et les limites d'interprétation qu'ils génèrent. Cela se retrouve dans les publications des producteurs de données (Noucher, 2023) jusqu'aux comités techniques qui élaborent des systèmes de mesure pour la protection de l'environnement (Catteau, 2023).

Ces acteurs techniques sont souvent tiraillés entre des ambitions contradictoires. Nous observons qu'ils sont conscients de certaines limites mais qu'ils sont parfois amenés à fermer les yeux en raison de manque de temps, de moyens ou encore en raison de l'obligation de souscrire à certains indicateurs quantitatifs pour accéder à des financements (Catteau, 2023).

La fréquentation de ces acteurs techniques, lors des conférences professionnelles ou leur observation sur leur lieu de travail, révèle que les données géographiques sont conçues comme de « représentations politiques de la réalité dont la signification est négociée entre politiciens, aménageurs, gestionnaires, ingénieurs... qui exigent tous que leur point de vue soit présenté dans les données » (Noucher, 2023).

Le recours aux méthodes mixtes met alors en évidence des rapports de force indicibles, parmi les concepteurs ou entre concepteurs et utilisateurs. Seule l'analyse fine de la mécanique des procédures SIG permet de déceler les différences de représentations, parfois absentes des discours. Dans ces rapports de force, il arrive que le recours aux SIG par les acteurs de l'environnement soit utilisé

comme un « gain d'indiscutabilité » (Trépos, 1996). Cet usage s'explique par une hiérarchie des connaissances et une faible reconnaissance de l'expertise naturaliste, mise à mal par le militantisme environnemental. L'utilisation du SIG comme un outil d'autorité donne cependant une crédibilité de court terme qui pourrait jouer en leur défaveur si les partenaires locaux prenaient conscience des présupposés et des incertitudes non explicitement affichés. Cela implique donc, pour le géographe, de porter l'attention aux modalités d'accompagnement de ces dispositifs techniques.

3) Accompagner plutôt que prescrire

Dans nos différents travaux, si l'utilisation des SIG ne se cantonne pas aux seuls géographes, elle reste l'apanage d'un public expert. L'expertise est thématique, elle porte sur l'environnement, et s'adresse à un public profane. Les approches scientifiques et quantitatives sont sollicitées pour fournir des éléments neutres d'autorité : « les sciences sont convoquées pour éclairer, justifier ou fonder au moins partiellement une décision politique : c'est l'articulation à la décision qui confère à la science valeur d'expertise » (Roqueplo, 1991).

L'expert étant garant de la connaissance, dans le domaine de l'environnement, la spatialisation des objets environnementaux est conçue en deux temps suivant un modèle diffusionniste. Le premier temps a l'ambition d'être purement technique, le second fait appel aux sciences sociales pour s'assurer de l'appropriation des dispositifs. Il est courant d'observer que les productions SIG sont conçues comme la traduction technique d'un objet connu par les experts et invisible pour un public non-averti. L'enjeu de la traduction spatiale est de rendre visible certains motifs environnementaux (Bouleau, 2019). L'utilisation des SIG a donc une perspective communicationnelle, il s'agit de faire passer un message et de retranscrire les conclusions d'une expertise.

Néanmoins, seules les personnes manipulant les données sont en capacité de percevoir l'effet des choix méthodologiques qui interviennent dans le processus de production. Ainsi, le processus métrologique est rendu inaccessible pour un public non-averti, fut-il constitué de décideurs. L'utilisation de l'outil affecte la dimension démocratique de la décision. Il y a donc un enjeu à publiciser la procédure, en rendant intelligible les démarches de reconnaissance et les objets reconnus à l'aide de la géomatique. Cela est d'autant plus prégnant dès lors que ces objets acquièrent une dimension réglementaire, la délimitation d'un zonage par SIG devenant une étape déterminante pour le passage à l'action.

Dans ce paradigme, le SIG est un outil prescriptif, pensé par un public expert à destination d'un public profane. L'effet d'autorité n'est pas lié au caractère factuel des objets représentés mais à l'effet boîte noire et à l'apparente complexité de la procédure pour le profane. Les utilisateurs non praticiens des SIG, qu'ils soient techniciens ou élus locaux, ne peuvent être que passifs face à la réception des cartes.

Pour les repositionner en tant qu'acteurs, la géographie peut abandonner le rôle de prescripteur pour adopter celui de médiateur en éclairant la boîte noire algorithmique pour que les utilisateurs puissent se saisir des enjeux méthodologiques. Cela permet d'intégrer des catégories d'acteurs jusque-là exclues du processus métrologique. Cette émancipation des acteurs est rendue possible

par la multiplication des représentations d'un même objet et la reconnaissance de « co-vérités » (Bouleau, 2014). De ce point de vue, le recours aux SIG n'a plus pour objectif de spatialiser un objet déjà connu mais de questionner collectivement et progressivement la nature de l'objet.

Ce besoin d'accompagnement des productions SIG est également présent dans des démarches scientifiques interdisciplinaires. La production SIG impose de formuler diverses questions sur l'ontologie de l'objet à spatialiser. La résolution des processus ou leurs délimitations par exemple peuvent être considérés comme un facteur de compréhension des phénomènes. La démultiplication des propositions montre que plusieurs traductions d'un même objet peuvent être apportées. Dès lors, « le paramétrage de la modélisation peut être envisagé comme une occasion de négocier, entre disciplines, les définitions et les modèles conceptuels » (Lobry et Catteau, 2023). Dans une perspective interdisciplinaire, le géographe devient médiateur entre les sciences : en montrant les tenants et les aboutissants des choix méthodologiques, les incertitudes liées aux données ainsi que les marges de manœuvre entre les concepts écologiques et les possibilités de représentation accordées par les SIG. Cela souligne la dimension politique des choix techniques.

Ainsi, lorsque l'appel à communication de Géopoint suggère un renforcement de la dimension prescriptive des SIG, nous proposons davantage une mise à distance de cette position. Le SIG a un effet d'autorité qui le rend d'emblée prescriptif. Se détourner de cette caractéristique apparaît comme un défi majeur pour la recherche en géographie et pour l'amélioration de mesures de protection de l'environnement.

Conclusion : enjeux éthiques d'un repositionnement critique

Porter un regard critique sur les métrologies environnementales place les géographes dans une situation politique potentiellement sensible : alors que de nombreux indicateurs fournissent l'image d'une société figée face aux crises actuelles, faire émerger du doute au cœur des dispositifs socio-techniques qui prônent un changement de cap, n'est-ce pas faire le jeu de l'immobilisme ? Le recours aux approches critiques des SIG que nous proposons pose nécessairement la question des éventuels effets non-productifs de cette critique dans le champ de l'environnement. Certains partenaires redoutent un affaiblissement de la protection des écosystèmes et la mise en lumière de failles desquelles pourraient profiter certains lobbys : « comment préserver un espace de controverse qui permette de ne pas abandonner l'expertise aux groupes de pression et de maintenir l'objectivité ? » (Roqueplo, 1992). Nous sommes cependant convaincus que la conception des SIG dans une approche critique est une condition de l'efficacité des mesures de conservation. Son absence abandonnerait la critique aux opposants et la découverte *a posteriori* des incertitudes inhérentes aux données par les partenaires pourrait alimenter une méfiance envers la communauté scientifique. L'accompagnement des dispositifs, au plus près de ce qu'ils sont, permet à ces partenaires de percevoir les enjeux politiques et sociaux du processus métrologique.

Dans la situation actuelle, particulièrement tendue depuis la crise sanitaire où les frontières entre science et politique sont poreuses, nous avons, tout de même, l'espoir de croire que nos travaux, connectés à ceux de nombre de nos collègues, peuvent contribuer à mettre sur la place publique les enjeux politiques contemporains de la fabrique et des usages des métrologies

environnementales. Nous souhaitons éviter un repositionnement des géographes qui consisterait à opérer un tournant plus marqué vers une posture se contentant de dénoncer et de refuser les affres de la quantophrénie ou de la boulimie cartographique. L'objectif est d'embarquer nos partenaires dans un changement de posture face à ces outils et d'éviter les effets de fascination, pour une prise en compte plus pragmatique de ses enjeux et une conscientisation des limites conceptuelles et des rapports de force qui s'y exercent. L'omniprésence de l'information géographique dans la société, et dans le champ de l'environnement, contraint à ne pas rejeter ces outils, ils seraient récupérés par d'autres, il s'agit plutôt de penser leur accompagnement. Nous percevons donc notre positionnement au service d'une lecture plurielle, complexifiante, politique et impliquée de la « métrologisation » de l'environnement.

- Une lecture plurielle qui multiplie les points de vue sur ces dispositifs, pour faire émerger les co-vérités¹ territoriales qui sont les produits d'autant d'interprétations.
- Une lecture complexifiante qui montre le caractère dialogique de ces processus, en analysant leur condition de production et d'utilisation pour décrypter leurs effets supposés ou cachés.
- Une lecture politique qui propose quelques clés d'interprétation sur les savoirs dominants qu'elles mettent en lumière et sur les savoirs qu'elles invisibilisent.
- Et finalement, une lecture impliquée qui permet aussi d'entrevoir les conditions dans lesquelles la société peut tenter de se réapproprier ces dispositifs.

Références

BOULEAU G., 2019, *Politisation des enjeux écologiques : de la forme au motif environnemental*. London, ISTE éditions.

BOULEAU N., 2014, *La modélisation critique*. Versailles Cedex, Éditions Quæ.

CATTEAU S., 2023, Bulles de dialogue et cellules raster. Spatialiser les fonctions et le fonctionnement des zones humides par SIG dans le bassin Rhône-Méditerranée Corse. Thèse de doctorat en géographie, Université Bordeaux Montaigne.

DALTON C., THATCHER J., 2014, "What does a critical data studies look like, and why do we care ? Seven points for a critical approach to 'big data'". Space and Society Open Site. [en ligne].

DI MÉO G. 2004, "Un regard de géographe" Dans BORD J.-P. et BADUEL P.-R. (dir.) *Les cartes de la connaissance*. Paris, Karthala et Urbama, p. 649-662.

¹ Nous empruntons cette notion à Nicolas Bouleau (2014). Partant du constat qu'un modèle élaboré avec soin est très difficile à « défaire » car ses hypothèses implicites et ses non-dits sont souvent complexes à déconstruire voire tout simplement à déceler, il propose la « modélisation critique » autrement dit la conception de plusieurs modèles pour faire émerger, autour de chaque phénomène étudié, des « co-vérités ».

- DI MÉO G., BULÉON P. [dir.] 2005, *L'espace social. Lecture géographique des sociétés*, Armand Colin.
- DODGE M., PERKINS C., 2015, Reflecting on J.B. Harley's Influence and What He Missed in "Deconstructing the Map". *Cartographica*, 50(1), pp. 37–40.
- ELWOOD S., COPE M., 2009, *Qualitative GIS: A mixed methods approach*. Thousand Oaks, CA, Sage.
- HARLEY J. B., 1989, "Deconstructing the map", *Cartographica*, Vol. 26, N°2, pp. 1-20.
- KWAN, M.-P. 2004. "Beyond difference: From canonical geography to hybrid geographies", *Annals of the Association of American Geographers*, Vol.94, pp. 756–763.
- LOBRY E., CATTEAU S., 2023, "Sous la carte, des jeux d'acteurs : cartographie de l'environnement et SIG critique", *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- NOUCHER M., 2023, *Blancs des cartes et boîtes noires algorithmiques*. Paris, CNRS Editions.
- PRESTON B., WILSON M. W., 2014, "Practicing GIS as Mixed Method: Affordances and Limitations in an Urban Gardening Study", *Annals of the Association of American Geographers*, Vol.104, N°3, pp. 510-529.
- ROQUEPLO P., 1991, "L'expertise scientifique : convergence ou conflit de rationalités ?" Dans THEYS J., LIBER V., PALACIOS, M.-P. *Environnement, science et politique. Les experts sont formels. Environnement, science et politique*. Les cahiers du GERMES. Paris, GERMES, Cahier n°13, pp. 43-80.
- ROQUEPLO P., 1992, "L'expertise scientifique, consensus ou conflit ?", pp. 183-198 Dans THEYS J., KALAORA B. (éds.), *La terre outragée, les experts sont formels !* Paris, Éditions Autrement.
- SCHUURMAN N., 2000, "Trouble in the heartland: GIS and its critics in the 1990s", *Progress in Human Geography*, Vol.24, N°4, pp. 569-590.
- TREPOS J.-Y., 1996, *La sociologie de l'expertise*. Paris, Presses universitaires de France.
- WILSON M. W., 2017, *New lines: critical GIS and the trouble of the map*. Minneapolis, University of Minnesota Press.
- WOOD D., 2015, "This is not about old maps", *Cartographica*, 50(1), pp. 14-17.

Projets géographiques, théories et modèles

André Dauphiné

Professeur émérite

Doyen honoraire de l'université Nice Sophia-Antipolis

Membre du groupe DUPONT

Damienne Provitolo

Directrice de recherche au CNRS

Université Côte d'Azur, CNRS, OCA, IRD

UMR Géoazur – Sophia-Antipolis

Résumé

Malgré une croissance vertigineuse des données et des modèles, les divers projets géographiques n'ont pas engendré de théories géographiques globales. Parfois, le recours à des théories sectorielles empruntées à d'autres sciences focalise l'attention des géographes pour comprendre et expliquer des phénomènes, mais les récentes thèses de doctorat du domaine tendent à révéler que cela est de plus en plus rare. Les géographes inscrivent leur recherche dans la géoprospective pour répondre à une demande sociétale de plus en plus prégnante sur des sujets variés allant du changement climatique aux études de genre. Il s'agit alors de proposer des solutions visant un meilleur futur, termes faisant d'ailleurs appel à la subjectivité. Les modèles d'apprentissage automatique, une forme d'intelligence artificielle basée sur des concepts mathématiques et statistiques, sont alors utilisés pour leurs dimensions prédictives. Mais ils soulèvent de nombreuses questions et demeurent un point d'interrogation pour l'avenir.

Summary

Despite a dizzying growth in data and models, the various geographical projects have not produced comprehensive geographical theories. Sometimes, geographers focus on sectoral theories borrowed from other sciences to understand and explain phenomena, but recent doctoral theses in geography tend to reveal that this is increasingly rare. Geographers are conducting geoprospective research in response to growing societal demands on a wide range of subjects, from climate change to gender studies. The aim is to propose solutions for a better future, in terms that appeal to subjectivity. Machine learning models, a form of artificial intelligence based on mathematical and statistical concepts, are used to make predictions. But new questions are emerging such as those relating to opportunities and challenges of AI.

Lors des anciens Géopoint les provocations fusaiement. Nous ne saurions abandonner cette lointaine tradition et veuillez donc excuser ce travers persistant. La science vise deux objectifs, comprendre et prévoir. Dans cette présentation nous traitons d'abord de la science géographique comme outil de compréhension (parties 1 et 2), avant de considérer dans une troisième partie les géographies prospectives, davantage axées sur la recherche de solutions durables, techniques etc. pour répondre aux défis du XXIe siècle. Mais avant d'aborder le but cette présentation, il est nécessaire de s'accorder sur le sens donné aux trois termes *projet, théorie, modèle*, pour éviter des débats nébuleux.

Premièrement, fidèle aux épistémologues rationalistes (Bachelard G., 1934 ; Bunge M., 1983), nous admettons qu'un *projet scientifique est un questionnement sur un objet*. Il n'y a pas d'objet proprement géographique. Aucun objet, aucun territoire ne nous appartient, pas plus le climat que la ville.

En outre, nous restons fidèles à une définition très précise du mot théorie. *Une théorie est un ensemble de lois inter-reliées. Cet ensemble, fondé sur des axiomes ou des postulats, est en relation avec le « réel » grâce à des principes externes.* La figure 1 illustre cette définition (Dauphiné A., 2003).

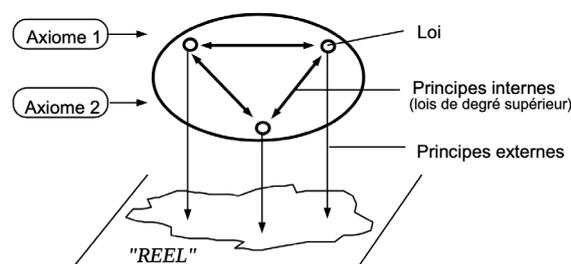


Figure 1 - Définition d'une théorie

Cette définition est fort éloignée de celle avancée dans un manuel, parfois excellent, mais qui en donne la définition suivante : « Un ensemble cohérent d'énoncés ». Cette définition, plus que large, signifie que la phrase suivante : « Il neige donc je suis à la maison » constitue un énoncé théorique. Il va s'en dire qu'un ensemble d'énoncés ne peut constituer une théorie.

En se focalisant sur la figure 1, le lecteur remarquera que les imprécisions et les incertitudes peuvent se glisser dans les axiomes, les lois ou les principes externes. Un seul exemple pour illustrer ce propos. La théorie gravitationnelle physique, transposée en géographie pour analyser les flux entre les villes, donne un rôle équivalent aux deux masses. L'interaction entre la masse 1 et la masse 2 est égale à celle calculée entre la masse 2 et la masse 1. Or, cet axiome valable en physique ne saurait être accepté en géographie, ne serait-ce que du fait de la forte différenciation des villes et des territoires par leur taille et leurs fonctions. Il est préférable de recourir à la théorie électromagnétique, qui distingue un pôle positif et un pôle négatif, et d'établir une analogie entre le courant électrique et le flux migratoire. Finalement une théorie permet par déduction de poser de nouvelles hypothèses qui devront être vérifiées pour devenir des lois.

De plus, *le terme modèle désigne une représentation de la réalité* et ne doit en aucun cas être synonyme de réalité (Durant-Dastès F., 1974). Or, dès la fin du XIX^e siècle, le statisticien G. Box apportait la réserve suivante : « Tous les modèles sont faux mais certains sont utiles ». Tout scientifique doit accepter cette idée, mais sous une formulation nettement plus nuancée. Il est vrai que tous les modèles sont imprécis et incertains, mais les modèles contiennent une part de vérité. En levant le voile sur une partie de la réalité, ils sont donc, sauf exception, toujours utiles. La preuve, la science progresse en réduisant les imprécisions et les incertitudes. Les imprécisions concernent les données et les paramètres inclus dans le modèle, tandis que les incertitudes touchent à la logique même du modèle.

Enfin, tout phénomène ou toute théorie est la source d'un et généralement de plusieurs modèles (Mathian H. et Sanders L., 2014). Ainsi, nous pouvons construire trois modèles de la théorie gravitationnelle. Le premier, en langage simple, s'énonce : « la force d'interaction entre deux objets est proportionnelle au produit de leurs deux masses divisé par la distance élevée au carré qui les sépare ». Un deuxième modèle, de forme graphique, est illustré par la figure 2.

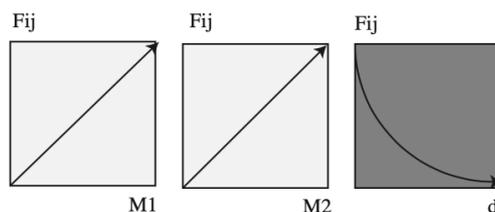


Figure 2 - Un modèle graphique de la théorie gravitationnelle

Sur cette base d'interaction, le mathématicien privilégie l'équation ci-dessous :

$$F_{12} = k * M_1 * M_2 / d^2$$

Armés de ces trois définitions, nous pouvons maintenant envisager les relations entre les projets géographiques, leurs théories et leurs modèles, qu'ils soient cartographiques, conceptuels, littéraires ou mathématiques, avant de s'interroger sur les modèles et la théorisation en géographie prospective.

1. Les deux projets de la géographie classique

Bien que différents, deux projets ont inspiré et guidé les travaux des géographes dits « classiques ».

1.1. La géographie, science des relations Nature – Sociétés

Cette géographie, dite « classique », a pour questionnement essentiel la compréhension et l'explication des relations entre la nature et les sociétés (Bavoux J-J., 2014 ; Claval P., 1998). Ce projet était très ambitieux, car il y a différentes façons d'envisager la nature, la société et leurs relations causales ou systémiques. Pendant des décennies, l'impact de la nature sur la société servit de guide à ces recherches. Les études de géographie régionale ou rurale de nos maîtres suivaient cette logique, du relief à l'économie et au social, en passant préalablement par le climat. Puis, un questionnement inverse s'imposa. Il s'agissait de comprendre comment les sociétés, leurs activités et les territoires qu'elles aménagent perturbent la nature. Ces recherches concernent par exemple le réchauffement climatique, les pollutions urbaines, les pertes de biodiversité marine induits par la sur-pêche, etc. Si les géographes contemporains (cf. partie 2) se sont majoritairement détournés de ce projet, d'autres disciplines ont pris le relais, notamment les géosciences, l'écologie ou les spécialistes de l'anthropocène.

Ce premier projet géographique ouvrit des débats sur quelques principes, comme le déterminisme physique, le possibilisme, voire le probabilisme. Mais, cette géographie n'engendra aucune théorie géographique générale. L'empirisme était la règle. Cependant, comme aucune science ne peut se passer de cadre théorique, on retrouve sous une forme cachée les théories de l'évolution de Lamarck et de Darwin. Cette géographie, qui accordait une large place à l'histoire, était en grande partie fondée sur le gradualisme des théories de l'évolution. Gradualisme dorénavant réfuté. De plus, quelques importations d'ordre théorique animaient les controverses dans certaines sous-disciplines. La plus importante fut indéniablement la théorie du cycle d'érosion du géologue W. Davis. Ce qui explique en partie la place prépondérante accordée auparavant en géographie à la géomorphologie. Prépondérance qui fut battue en brèche quand les géomorphologues refusèrent toute démarche théorique et accordèrent leur faveur aux études de terrain. Ils firent alors de la géographie « avec leurs pieds » selon plusieurs dénigreur malicieux.

À ce projet géographique ambitieux, correspondent trois formes de modélisation. La première, la modélisation littéraire demeure un exemple. En effet, la relecture des grands textes de ces anciens procure un sentiment d'humilité, qu'il s'agisse des ouvrages d'E. de Martonne (1921) ou de P. Vidal de la Blache (1922). Les évocations de paysages y sont particulièrement soignées. Les modèles graphiques, notamment les blocs diagrammes des reliefs, sont une deuxième forme de modélisation. Ils

ne manquent pas de précision tout en dégageant une certaine poésie. Parfois même ils illustrent une dynamique en utilisant une superposition de croquis élémentaires. En témoigne cette formation des *cuesta* selon E. de Martonne (figure 3).

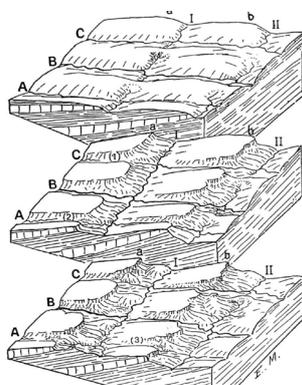


Figure 3 - La formation des *cuesta* selon de Martonne

Cependant, l'outil de modélisation par excellence demeure la cartographie. Elle envahit toutes les formes de géographie, physique, humaine et régionale. Son principal objectif reste de proposer une représentation du réel en rajoutant sans cesse des figurés. Cette accumulation de symboles, dénoncée ultérieurement, est très fréquente dans les ouvrages de géographie régionale. Les premiers manuels de cartographie sont livrés. Et l'épreuve du commentaire de carte inquiète les candidats au concours de l'agrégation.

En conclusion, cette géographie très ambitieuse ne possède pas de véritable fondation théorique. Et ses modèles manquent d'objectivité au regard d'autres sciences comme la géophysique, l'astronomie ou la biologie. Cet écart, de plus en plus ressenti, va devenir une contradiction de moins en moins acceptée par la nouvelle génération des années soixante.

1.2. *La géographie, science des localisations*

Un deuxième projet géographique, à première vue moins vaste, anime aussi la géographie de nos maîtres. Il s'agit d'un projet qui constitue un premier « tournant spatial » (Lefebvre H., 1974), à savoir une plus grande attention portée à l'espace pour comprendre les phénomènes. En effet, ce projet vise à étudier les localisations et donc à répondre aux questions *Où* et *Pourquoi Où*. Cette focalisation sur les localisations concerne plutôt les activités humaines. En réalité, cet objectif est tout aussi ambitieux. En effet, si tout phénomène possède une seule localisation absolue, qui n'offre pas d'intérêt majeur, ses localisations relatives sont au contraire souvent déterminantes. Tout phénomène s'inscrit dans une multitude de réseaux et de champs (Auriac F., 1981). Soit l'exemple classique de la localisation des résidences considérée sur une surface plane autour d'une bourgade. Les tests menés sur les localisations de ces maisons permettent de conclure à une répartition aléatoire. Pourtant, il suffit de comparer ces localisations à celles des voies de communication ou en tenant compte de leur distance au centre-ville pour obtenir un résultat différent. Or, ce jeu des localisations relatives est pratiquement infini. D'ailleurs, ce fait était déjà reconnu par quelques géographes de la période classique. Dans son étude sur Annecy, R. Blanchard (1953) analyse bien cette question en distinguant les effets de site, puis de situation, donc deux localisations relatives différentes.

Comme pour la géographie étudiant les relations Nature - Société, cette science des localisations n'a façonné aucune théorie générale, même si elle révèle la nécessité d'une approche multi-échelle pour

comprendre tout phénomène géographique. En revanche, cette géographie va puiser un cadre théorique sectoriel en économie spatiale. Les théories de Von Thünen, de Weber, de Christaller et de Loesch guident les recherches sur les localisations des cultures, des industries et des lieux centraux. Ces théories furent l'objet d'une double critique, des marxistes et des behavioristes (Mérenne-Schoumaker B., 2002). Parfois, les théories de l'évolution restent un cadre explicatif, comme en témoigne le modèle du développement de la ville par Burgess (Derycke P-H et al., 1996).

Cette théorisation, quelle que soit ses lacunes, provoqua un regain d'intérêt pour la modélisation mathématique. On enseigna l'équation qui modélise la théorie de Von Thünen. Des petits programmes informatiques permirent alors des simulations, des expérimentations en faisant varier divers paramètres, notamment la distance au marché. Les géographes découvrirent aussi les capacités de la théorie mathématique des graphes pour trouver la localisation optimale d'une industrie. Le modèle de Weber est un cas particulier du modèle de Steiner. Cette approche de la modélisation mathématique alla de pair avec l'essor des statistiques déjà bien présentes en climatologie et en démographie.

2. La géographie contemporaine, science des organisations territoriales

La géographie contemporaine affiche un nouveau projet : comprendre et expliquer les organisations territoriales. Ce projet s'affirma d'abord en se focalisant sur les différenciations spatiales (Brunet R., 2001 ; Dumolard P., 1981). Puis l'attention se porta sur l'étude des structures territoriales, avant d'aborder la question des dynamiques (Sanders L., 1992). Ainsi, le projet de la géographie est assimilable à l'étude des morphologies et des morphogénèses territoriales. Il constitue donc un second tournant spatial, tournant qui concerne toutes les sciences humaines et sociales (Boutot A., 1993 ; Levy J., 1999). En même temps la géographie se veut de plus en plus une science sociale. De nombreux géographes minimisent le rôle de la nature, puis ils l'ignorent même totalement. Un paradoxe car cette nature dégradée par les révolutions industrielles devient un champ d'études privilégié pour d'autres disciplines.

En matière de théories, on assiste à une double évolution. D'une part, une grande majorité de géographes replonge dans le seul empirisme. Suite au déclin du marxisme, ces géographes se méfient et refusent même toute approche théorique. Ils oublient que le marxisme est un paradigme qui englobe plusieurs théories, de qualité inégale. D'autre part, quelques géographes poursuivent leur quête théorique (Martin Ph., 2018). Ils espèrent faire émerger une théorie générale pour faire progresser, en termes scientifiques, ce nouveau projet géographique. La plupart d'entre eux se tournent vers des théories formelles empruntées à d'autres disciplines, mais dont le transfert apporte un cadre à leur recherche. Parmi cet ensemble de théories formelles, certaines sont bien adaptées pour aborder des questions précises. Par exemple, la théorie des catastrophes de R. Thom (1983) servira de guide à des analyses sur les discontinuités. Les théories de la relativité d'échelle de L. Notalle (1998), constructive d'A. Bejean (2013) et des systèmes auto-organisés critiques de P. Bak (1999) permettent de traiter sérieusement des phénomènes multi-échelles (Laguës et Lesne, 2003). Nous avons utilisé cette approche pour mieux comprendre l'organisation des réseaux urbains, remplacer le modèle de la perturbation norvégienne par celui de la perturbation fractale, et comprendre certains risques, qu'ils soient dits naturels, technologiques ou sociétaux (Dauphiné A., Provitolo D., 2003, 2013). La théorie réaction-diffusion des chimistes et des écologues, généralisée en théorie croissance-mouvement, est sans doute plus englobante. Elle permet une approche féconde pour analyser les dynamiques territoriales. Enfin, le géographe peut s'inspirer des deux principales théories de l'entropie avancées par les astrophysiciens F. Roddier (2012) et C. Rovelli (2014). Toutes ces théories plongent le géographe dans le monde de la complexité (Batty M., 2013 ; Dauphiné A., 2003 ; Péguy Ch-P., 2001 ; Pigeon, 2005 ; Provitolo D., 2019 ; Pumain D., 2004 ; Pumain et al. 1989).

En modélisation, les géographes disposent d'une panoplie sans cesse grandissante d'outils. Il est pratiquement impossible de tous les retenir. Citons quelques progrès évidents. Les modèles cartographiques ont été renouvelés grâce à l'essor de l'informatique (Cauvin C., 2008) et de la télédétection (Weber Ch., 1995). Ils sont dorénavant relayés et inclus dans les SIG. L'étude des réseaux impose une formation aux modèles issus de la théorie des graphes (Barabási L., 2002 ; Genre-Grandpierre C., 201 ; Pastor-Satorras R., Vespignani A., 2004), tandis que pour conduire des études multi-échelles s'imposent les décompositions en ondelettes, les algorithmes multi-fractales (Dauphiné A., 2011; Frankhauser P., 1994 ; Martin Ph., 2004), et les modèles de l'information (Atlan H., 1972). Une approche temporelle bénéficiera des algorithmes relatifs aux traitements de chroniques. Bien évidemment, en micro-modélisation, le géographe dispose des automates cellulaires et des systèmes multi-agents (Banos et al., 2015 ; Benenson I., Torrens P. M., 2004 ; Collard Ph., et al, 2013 ; Langlois P., 2010 ; Maneerat S. et Daudé, 2017 ; Shelling, 1978 ; Treuil J-P. et al., 2008). Et il se formera aux systèmes d'équations différentielles partielles pour élaborer des macro-modèles spatio-temporels (Roques L., 2013; Lanza, V. et al., 2023). Entre ces deux niveaux, il est souvent utile de recourir à la simulation de processus stochastiques, en deux ou trois dimensions (O'Sullivan D., Perry G. L-W., 2013). En fait, dans toute recherche, le géographe contemporain se sert d'un cocktail de modèles (Sanders L., 2001). Et dans ce cocktail, n'oublions pas les cartographies inspirées de la chorématique (Grataloup Ch., 1996).

En conclusion, le recul des explications d'ordre théorique et la prolifération des outils de modélisation replongent la géographie dans l'empirisme, la recherche de données pour calibrer les modèles, l'accumulation d'études parcellaires qui entravent ses progrès. Cette tendance est renforcée par les apports du Big data. Seule consolation, ce constat s'applique aussi aux autres sciences sociales.

3. Les géographies prospectives au défi de l'apprentissage automatique

Suite à une « demande sociale » d'expertise de plus en plus impétueuse, l'objectif du géographe n'est plus de comprendre mais d'agir et de proposer des solutions pour espérer un meilleur futur. Cette orientation n'est pas neuve. Elle donna lieu à divers débats sur la géographie appliquée ou l'aménagement du territoire (Eckert D, 1996 ; Koby A., 2023). Cet objectif peut s'appliquer aux trois projets géographiques exposés précédemment. Dans ce type de géographie, la démarche théorique ne semble pas nécessaire car il est possible de faire des projections ou des prévisions d'un phénomène sans grande compréhension, en établissant des corrélations entre une multitude de variables ou en procédant à l'analyse de séries chronologiques si présentes en économétrie.

En revanche la modélisation, sous toutes ses formes, notamment la cartographie automatique et les SIG (Rossello Ph., 2023) deviennent un outil fondamental. Parmi tous ces modèles, l'apprentissage automatique est dorénavant requis par toutes les disciplines scientifiques. La modélisation par apprentissage automatique comprend trois phases (Azencott Ch-A., 2022). La première est la phase d'apprentissage par l'ordinateur. À partir d'un ensemble de données l'ordinateur détermine un modèle et quelques indicateurs qui permettent d'en mesurer la précision générale. La seconde phase, qualifiée d'évaluation ou d'inférence, applique alors le modèle à quelques données test. De nombreux critères, comme la matrice de confusion ou le graphique de SHAP permettent de mieux apprécier la qualité du modèle. Quand ce test est satisfaisant, lors d'une troisième phase, le modèle est appliqué à toutes les données que le chercheur souhaite analyser. Les progrès de cette forme de modélisation sont très rapides. En médecine, il est possible d'établir de meilleurs diagnostics qu'un médecin en partant des résultats d'un scanner. Mais les nouvelles pratiques basées sur l'intelligence artificielle et la « doxa de l'amélioration des traitements et des diagnostics » imposerait là encore une « théorie critique du devenir de la médecine » (Sadin, 2018).

Les spécialistes de ces modèles proposent une très grande variété d'approche. Elles sont maintenant intégrées dans les grands logiciels que sont *Mathematica* (Bernard E., 2021), *MathLab* et *R* (Biernat E., Lutz M., 2016). D'abord, les données, qui constituent l'ensemble d'apprentissage, peuvent être de nature différente, du texte, des valeurs numériques, des images, des cartes ou même une combinaison de ces données. De plus, pour construire le modèle d'apprentissage, plusieurs types de démarches sont également disponibles. On distingue l'apprentissage supervisé, quand les données initiales sont étiquetées, et l'apprentissage non supervisé, qui est utile pour détecter des anomalies. Mais d'autres approches sont parfois plus efficaces, par exemple l'apprentissage dit renforcé ou l'apprentissage auto-supervisé.

Un deuxième critère à considérer pour construire un modèle de qualité concerne les algorithmes utilisés pour élaborer le modèle d'apprentissage (Dreyfus G. et al, 2002). Avant 2012, la modélisation par apprentissage automatique mobilisait des outils statistiques déjà connus (Tufféry St., 2015), notamment les régressions, les classifications, mais aussi les forêts aléatoires, les arbres de décisions, les modèles de Markov, et les machines à support de vecteurs. Puis, après 2012, les réseaux de neurones envahissent le domaine de l'apprentissage automatique. Ils comptent de plus en plus de couches, aux fonctions multiples. C'est l'époque du deep learning (apprentissage en profondeur). Plus récemment, des réseaux de neurones spécialisés sont proposés aux chercheurs (Heudin J-Cl., 2016). Les LLM (Large Language Models) sont à l'origine de ChatGPT, une modélisation qui permet de construire un poème en imitant Baudelaire ou Eluard. Plus intéressant pour le géographe, les réseaux convolutifs de neurones s'inspirent du cortex visuel des animaux et humains. Ils ont révolutionné le traitement d'images.

Au-delà de leur fonction prédictive avérée, deux questions se posent au géographe. Ces modèles apportent-ils un supplément de connaissances ? Peuvent-ils faire émerger de nouvelles théories géographiques ? La réponse à la première question est indéniablement Oui. Citons trois exemples. D'abord, il serait facile de positionner un jeune géographe par rapport à la dizaine de courant de pensée repérables dans le célèbre groupe DUPONT. L'ensemble de données de départ (le training test) comprendrait deux à trois petits textes étiquetés de quelques membres DUPONT et par apprentissage l'ordinateur donnerait un modèle, en fait une fonction classificatoire. Lors de la deuxième phase, on donnerait en entrée, un, deux ou plusieurs textes du jeune chercheur, et en sortie on obtiendrait, sous la forme de probabilité, des rapprochements avec tel ou tel membre des DUPONT. En généralisant, ce type de démarche devrait renouveler les recherches épistémologiques et historiques sur la pensée et les courants géographiques. Les épistémologues et les historiens de la géographie au CNRS deviendraient inutiles. N'est-ce pas ?

Le deuxième exemple a donné lieu à une véritable recherche sur l'évolution du climat en Antarctique. Selon le GIEC, le réchauffement est dû à l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, principalement du CO₂ tandis que pour les « solaristes » c'est le soleil qui est responsable du réchauffement. L'apprentissage automatique permet d'attribuer une probabilité à chacun de ces mécanismes, notamment au rôle du CO₂. D'abord, il est possible de reconstruire, la série des températures allant de 1650 à 1850 pour une ou plusieurs stations de ce vaste continent. Ces données, qui représentent une évolution sans CO₂ peuvent servir d'échantillon et par apprentissage automatique fondé sur un réseau de neurones, certains chercheurs proposent un modèle permettant de simuler cette première évolution. Et avec ce modèle, les chercheurs prolongent cette série pour les 170 années suivantes, de 1850 à 2020. Ces projections correspondent à l'évolution des températures qui se serait produite sans l'impact des gaz à effet de serre. En comparant cette nouvelle série à la série des relevés effectués réellement à partir de 1850, on en déduit ce qui revient dans le réchauffement constaté à l'augmentation des gaz à effet de serre.

Vous trouverez un troisième exemple dans l'ouvrage consacré à la modélisation en géographie avec le langage *Mathematica* (Dauphiné A., 2017). Il concerne l'emploi plus objectif des modèles de chorèmes pour analyser la structure d'une répartition géographique, en l'occurrence une carte des densités de population en France.

En revanche, dans la plupart des champs de la connaissance, cette approche ne semble pas provoquer l'émergence de nouvelle théorie scientifique. En l'état, la réponse à la seconde question (qui rappelle le consiste à savoir si ces modèles peuvent faire émerger de nouvelles théories géographiques) est *Non*. Est-ce une limite qui sera bientôt franchie ? Nous avouons notre perplexité. Une solution à envisager consisterait à partir non pas uniquement de données chiffrées, textuelles ou visuelles, mais plutôt de fonctions, ce qui reviendrait à élaborer par apprentissage un modèle de fonctions, donc une théorie.

Conclusion

Quel que soit le projet géographique, à l'ère du Big data occasionné par une croissance vertigineuse de données et la multiplication des types de modèles, l'empirisme revient en force dans les sciences sociales. Les connaissances parcellaires s'accroissent. Mais ces apports ne suscitent guère de réflexions théoriques. La géographie, quel que soit son projet, ne parvient pas à échapper à cette tendance.

Plus généralement, le schéma ci-dessous (figure 4), qui illustre les progrès de la modélisation physique de l'évolution du climat au cours des cinquante dernières années, débouche sur un véritable paradoxe. Indéniablement, les modèles sont de plus en plus complets, mais les plages d'incertitudes concernant les données simulées par ces modèles demeurent stables.

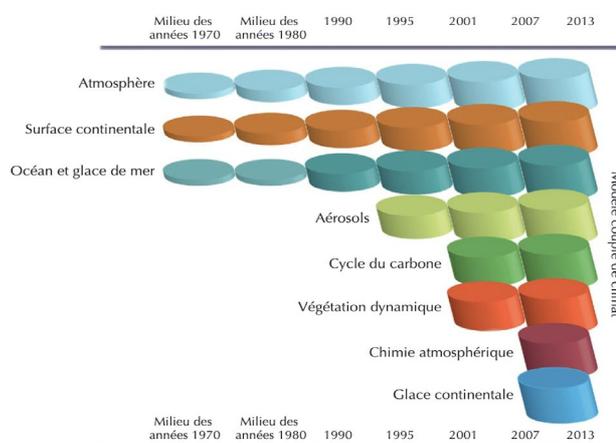


Figure 4 - Évolution de la modélisation du changement climatique

Ainsi, nous vivons dans un monde de mieux en mieux compris, mais dont le futur est de moins en moins certain.

Bibliographie

- Atlan H., 1972, L'organisation biologique et la théorie de l'information, Paris, Hermann.
- Auriac F., 1981, Système économique et espace, Paris, Economica.
- Azencott Ch-A., 2022, Introduction au Machine Learning, Paris, Dunod.
- Bachelard G., 1934, Le nouvel esprit scientifique, Paris, PUF.
- Bak P., 1999, Quand la nature s'organise, Paris, Flammarion.
- Banos A., Lang C., Marilleau N., 2015, Simulation spatiale à base d'agents avec Netlogo, Iste.

- Barabási L., 2002, *The New Science of Networks*. Basic Books, 1st edition.
- Batty M., 2013, *The New Science of Cities*, London, MIT Press.
- Bavoux J.-J., 2002, *Géographie, objet, méthodes et débats*, Paris, Armand Colin.
- Béjan A., Zane J. P., 2013, *Design in Nature*, First Anchor Books Edition.
- Benenson I., Torrens P. M., 2004, *Geosimulation Automata-based modeling of urban phenomena*, Hoboken, John Wiley.
- Bernard E., 2021, *Introduction to Machine Learning*, Champaign, WolframMedia.
- Biernat E., Lutz M., 2016, *Data Science : fondamentaux et études de cas*, Paris, Eyrolles.
- Blanchard R., 1957, *Annecy. Essai de Géographie urbaine*, Annecy.
- Boutot A., 1993, *L'invention des formes*, Paris, Odile Jacob
- Bunge M., 1983, *Épistémologie*, Paris, Maloine.
- Brunet R., 2001, *Le Déchiffrement du Monde. Théorie et pratique de la géographie*, Paris, Belin.
- Claval P., 1998, *Histoire de la Géographie française de 1870 à nos jours*, Paris, Nathan Université.
- Cauvin C., 2008, *Cartographie thématique*, Paris, Hermès, 5 volumes.
- Collard Ph., Verel S., Clergue M., 2013, *Systèmes complexes - Une introduction par la pratique*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Dauphiné A., 2003, *Les théories de la complexité chez les géographes*, Anthropos, Paris.
- Dauphiné A., Provitolo D., 2003, *Les catastrophes et la théorie des systèmes auto-organisés critiques*, dans V. Moriniaux, *Les risques*, Editions du Temps, Nantes, 2003.
- Dauphiné A., 2011, *Géographie fractale*, Paris, Hermès.
- Dauphiné A., 2017, *Geographical Models with Mathematica*, London, ISTE, Elsevier.
- Dauphiné A., Provitolo D., 2013, *Risques et catastrophes – Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, A. Colin (2^{ème} édition), Collection U.
- De Martonne E., 1921, *Les régions géographiques de France*, Paris, Flammarion.
- Derycke P-H, Huriot J-M, Pumain D., 1996, *Penser la ville*, Paris, Anthropos, 335p.
- Dreyfus G. et al, 2002, *Réseaux de neurones*, Paris, Eyrolles.
- Dumolard P., 1981, *L'espace différencié*, Paris, Economica.
- Durant-Dastès F., 1974, *Quelques remarques sur les modèles et leur utilisation en géographie*, Paris, BAGF.
- Eckert D, 1996, *Évaluation et prospective des territoires*, RECLUS, La Documentation française.
- Frankhauser P., 1994, *La fractalité des structures urbaines*, Economica, Anthropos, Coll. Villes, Paris
- Grataloup CH., 1996, *Lieux d'Histoire. Essai de géohistoire systématique*, Reclus, La Documentation française.
- Heudin J-Cl., 2016, *Comprendre le Deep Learning*, Science eBook.
- Koby Assa Th., 2023, *Essai sur une géographie de l'avenir*, Paris, L'Harmattan.
- Kucharski A., 2020, *Les lois de la contagion, fake news, virus, tendances*, Paris, Dunod.
- Genre-Grandpierre Cy., 2011 : "Characterizing form and functioning of transportation networks", pp. 83-113, in Banos A., Thevevin T (ed) *Geographical information and urban transport systems*, Geographical Information systems series ISTE, Wiley
- Laguës M. et Lesne A., *Invariance d'échelles*, Belin, Paris, 2003.
- Langlois P., 2010, *Simulation des systèmes complexes en géographie*, Paris, hermes-Lavoisier.

- Lanza V., Provitolo, D., Verdière, N., Bertelle, C., Dubos-Paillard, E., Navarro, O., Charrier, R., Mikiela, I., Aziz-Alaoui, M., Boudoukha, A.H., et al., 2023, Modeling and Analysis of the Impact of Risk Culture on Human Behavior during a Catastrophic Event. *Sustainability*, 15.
- Lefebvre H., 1974, La production de l'espace, Paris, Anthropos, Ethnosociologie.
- Levy J., 1999, Le tournant géographique, Paris, Belin.
- Maneerat S. et Daudé E., 2017, « Agent-based simulation study of the intra-urban discontinuity effects in Delhi on dispersal of *Aedes aegypti* mosquitoes, vector of dengue, chikungunya and Zika viruses », *Cybergeog: European Journal of Geography*.
- Mathian H., Sanders L., 2014, Objets géographiques et processus de changement, Londres, ISTE Éditions.
- Martin Ph., Modélisation fractale et structurelle des formes en géographie. Réflexion développée à partir d'exemples karstiques, Avignon, HDR, 3 tomes, 2004.
- Martin Ph., 2018, Servir le futur. Ecueils et perspectives pour la géographie de demain, définis à partir de l'histoire du groupe DUPONT, Paris, BAGF.
- Mérenne-Schoumaker B., 2002, Analyser les territoires, Savoirs et outils, Rennes, Presses Universitaires de Rennes.
- Nottale L., 1998, La relativité dans tous ses états, Paris, Hachette Pluriel.
- O'Sullivan D., Perry G. L-W., 2013, Spatial Simulation Exploring Pattern and Process, Chichester, Wiley-Blackwell.
- Péguy Ch-P., 2001, Espace, temps, complexité, vers une metagéographie, Belin, Paris.
- Pastor-Satorras R., Vespignani A., 2004, Internet : Structure et évolution, Belin, Paris.
- Pigeon P., 2005, Géographie critique des risques, Economica, Paris.
- Provitolo D., 2009, « A new classification of catastrophes based on "Complexity Criteria" », ^[SEP]*From System Complexity to Emergent properties*, Springer, Series Understanding complex systems
- Provitolo D., 2019, Des modèles multiples pour l'étude des risques et catastrophes, Habilitation à diriger des recherches, Université Côte d'Azur.
- Pumain D., Sanders L., Saint-Julien T., 1989, Villes et auto-organisation, Economica, Paris.
- Pumain D., 2004, Scaling laws and urban systems, Santa Fe Institute pre-prints.
- Roddier F., 2012, Thermodynamique de l'évolution, Artignosc, Éditions Parole.
- Roques L., 2013, Modèles de réaction-diffusion pour l'écologie spatiale, Paris, Éditions Quae.
- Rossello Ph., 2023, Pourquoi la géoprospective est au coeur de la transition écologique, Colloque Avignon.
- Rovelli C., 2014, Par-delà le visible, la réalité du monde physique et la gravité quantique, Paris, Odile Jacob.
- Sadin E., 2018, L'intelligence artificielle ou l'enjeu du siècle – Anatomie d'un antihumanisme radical. Ed. L'échappée, Collection Pour en finir avec.
- Sanders L., 1992, Systèmes de villes et synergétique, Paris. Anthropos.
- Sanders L., 2001, Modèles en analyse spatiale, Paris, Hermes.
- Schelling T. C., 1978, Micromotives and Macrobehavior, New York, W. W. Norton.
- Thom R., 1983, Paraboles et catastrophes, Paris, Flammarion.
- Treuil J-P., Drogoul A., Zucker J-D., 2008, Modélisation et simulation à base d'agents, Paris, Dunod.
- Tufféry St., 2015, Modélisation prédictive et Apprentissage statistique, Paris, Éditions TECHNIP.
- Vidal de La Blache P., 1922, Principes de géographie humaine, Paris, Armand Colin.
- Weber Ch., 1995, Images satellitaires et milieu urbain, Hermes, Coll. Géomatique.

Faut-il pouvoir mesurer la consommation d'espace pour la réduire ?

Rémi Delattre, Thibault Lecourt - Avignon Université, UMR ESPACE

Quand la mesure fait la loi

Le problème public de la réduction de la consommation d'espace a été posé bien avant que nous disposions d'une mesure consensuelle du phénomène. Déjà la loi SRU il y a plus de vingt ans appelait à une transition vers un urbanisme plus mixte et plus dense. L'ambition de quantifier la réduction de l'étalement urbain est quant à elle plus récente. Les efforts précédents de réduction de la consommation d'espace ont contribué à une réduction du rythme de l'artificialisation : l'inflexion est visible dès le début de la décennie 2010. La loi Climat et résilience entreprend de réduire de 50% une consommation qui ne saurait être mesurée. Entre cet objectif ambitieux et son application se glisse donc le problème de la quantification. La loi propose de fixer des définitions afin de clore les débats. Ainsi, la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF) est définie comme « *la création ou l'extension effective d'espaces urbanisés* » (article 194 de la loi Climat et résilience). C'est elle qui est mesurée pour la période 2021-2031. Au-delà, on mesure l'artificialisation entendue comme « *altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol* » (*ibid.*) et plus particulièrement l'artificialisation nette, c'est-à-dire « *le solde de l'artificialisation et de la renaturation des sols constatées sur un périmètre et sur une période donnés.* » (article L.101-2-1 du code de l'urbanisme). La définition repose sur une nomenclature en quatorze classes taillée pour l'occasion, mais qu'il ne serait pas surprenant de voir évoluer d'ici 2031.

Le recours à la notion de consommation d'espace naturels, agricoles et forestiers devait permettre, aux yeux du législateur, une transition sans rupture vers la sobriété foncière. La notion est en effet connue des élus et des bureaux d'études depuis des années. Pour autant, cette continuité rhétorique masque des évolutions radicales dans les pratiques de planification. Aussi, la stricte application d'une réduction de 50% conduit parfois, dans les documents de planification, à ce que les services de l'Etat comptent les superficies dévolues à l'urbanisation au mètre carré près. On est loin du régime qui perdurait jusqu'alors et qui voyait les communes justifier leur consommation sans nécessairement entreprendre de la réduire. Une circulaire du Ministre de la Transition écologique a récemment autorisé un dépassement de 20% des zones constructibles des documents d'urbanisme par rapport à l'enveloppe réelle de droits à construire. Pour autant, la marge de manœuvre paraît limitée compte tenu de la pratique ancienne de constitution de réserves foncières locales étendues.

Plus largement, la primauté donnée à la mesure interroge quant à la vision de la planification urbaine portée par l'objectif zéro artificialisation net. La réduction de 50%, on nous l'assure, n'a pas à être appliquée au niveau local et la territorialisation doit faciliter l'avènement de véritables projets collectifs autour de la mutualisation des hectares du ZAN. Mais en attendant cet horizon qui ne devrait être réalisé qu'en 2028, les services de l'Etat n'ont d'autre choix que de raisonner à partir d'une base 50%. Il en résulte une inversion dans la logique de planification observable dans de nombreux documents d'urbanismes : un chiffre maximal est donné, celui-ci se transforme en objectif et c'est encore par rapport à lui qu'on déterminera les possibilités. Une vision plus stratégique de la planification urbaine ne suppose-t-elle pas d'avantage d'adaptations ? L'arithmétique du ZAN a parfois tendance en tout cas à décourager certaines collectivités locales d'entreprendre des projets qui

iraient dans le sens de la densification mais qui dépassent légèrement des quotas alloués. Quant à l'espoir placé dans la territorialisation, il se heurte à une faible appropriation du dispositif par des élus parfois réticents à céder leurs hectares constructibles. Dès lors, le dispositif s'apparente à une correction à la marge des enveloppes de droits à construire, et l'on continue à penser la consommation d'espace au niveau local, alors que l'aménagement du territoire se veut de plus en plus intégrateur et interterritorial.

Un phénomène difficile à mesurer à partir de données imparfaites

La mesure de la consommation d'espace passée déterminant les droits à construire à venir, il est crucial de disposer des données pertinentes et harmonisées à l'échelle nationale. Or, à ce jour, aucune base de données ne permet d'apprécier à une échelle fine l'évolution de l'occupation du sol sur l'ensemble du territoire, mises à part les données cadastrales produites par la DGFIP¹. Ce sont donc elles qui servent de support à la mesure de la consommation d'espace sur les dix dernières années, mais elles comportent plusieurs biais. D'abord, elles sont établies sur la base de déclarations fiscales remplies par les contribuables dans un objectif de prélèvement de l'impôt et non de suivi de l'occupation de sol. Par ailleurs, elles impliquent des retraitements considérables, parfois manuels, pour tenter d'harmoniser certains espaces tantôt considérés comme artificiels et tantôt comme naturels (terrains militaires, golfs, carrières...). Enfin, une partie du territoire, correspondant globalement au domaine public, n'est pas cadastrée et se retrouve donc absente de cette base de données ; pourtant, dans un contexte de rareté foncière, le domaine public est parfois mobilisé pour des opérations de construction, et la consommation d'espace conséquente n'est alors pas comptabilisée.

Ces imperfections peuvent conduire dans certains territoires à de véritables lacunes, ou au contraire à des surestimations importantes, dans la mesure de la consommation d'espace. Pour y remédier, l'État prévoit de mesurer l'artificialisation par l'occupation des sols à grande échelle (OCSGE), processus de production de données principalement issues de photographies aériennes déjà engagé et qui devrait aboutir fin 2025. Cette nouvelle source de données, précise, fiable, harmonisée et exhaustive, portera sur l'artificialisation nette, et devra donc être comparée à la mesure de la consommation d'espace basée sur les données foncières pour les années précédentes. Autres données, autres méthodes, mais le problème reste le même : comment mesurer si la consommation d'espace réduit effectivement de 50 % d'ici 2031 par rapport aux 10 dernières années ? Ces imperfections ont néanmoins le mérite d'ouvrir le débat et d'inciter les acteurs locaux à porter le regard sur la consommation de leur territoire.

Une mesure à l'épreuve des usages

La possibilité ouverte par la loi Climat et résilience d'utiliser des mesures de la consommation d'espace différentes de celle proposée par l'observatoire de l'artificialisation introduit une flexibilité dans l'application de la loi. Les communes peuvent avoir recours à leurs propres données et donc

¹ Direction Générale des Finances Publiques

majorer leur consommation d'espace passée afin d'augmenter leurs enveloppes de droits à construire. Libres à elles également d'omettre du compte certaines consommations projetées afin de ne mesurer que celles qui les maintiendraient dans une trajectoire de diminution de 50%. L'échec de la construction d'un indicateur commun s'est soldé par une redéfinition par la pratique de la notion de consommation d'espace, de plus en plus assimilée à la seule consommation d'espace en extension de l'enveloppe urbaine communale. Deuxièmement, alors que les communes ont jusqu'en 2028 pour se mettre en compatibilité avec le ZAN, elles sont amenées à réduire leur consommation décennale de 50% par rapport aux dix dernières années. Il en résulte que durant sept des dix années, rien ne les contraint à consommer moins, si ce n'est les incitations des services de l'Etat à « anticiper sur le ZAN ». Aucun régime de sanctions n'a été prévu pour les communes qui s'avèreraient en situation de dépassement en 2028, et dès 2021, certaines communes prévoyaient de « manger tout le gâteau tout de suite », quitte à dépasser. Toutes ces manœuvres interviennent alors que le stock de droits à construire demeure calculé à partir d'une méthode qui n'est pas celle mobilisée pour quantifier la consommation future. Il en résulte par exemple qu'une commune qui aurait installé une centrale photovoltaïque au cours de la décennie précédente peut capitaliser sur ces droits acquis alors que le photovoltaïque ne constitue pas une consommation d'espace pour la décennie actuelle. Ces pratiques de planification ouvrent la possibilité de réduire la consommation d'espace de 50% d'ici 2031 alors que l'artificialisation poursuit la dynamique légèrement baissière observée au cours de la décennie précédente. Le maquillage des chiffres érigé en dogme de la planification urbaine peut sembler signer l'échec du dispositif mais on peut aussi considérer que ces manipulations sont une condition nécessaire à l'application de la politique. Le retard pris par la territorialisation – et donc par l'application de la surface minimale de développement – a privé de nombreuses communes de droits à construire. En attendant 2028, elles planifient à partir d'une base 50% qu'elles accroissent par les techniques précitées. Dans certains contextes (communes rurales privées de droits à construire, communes périurbaines connaissant un fort développement résidentiel, métropoles) une application à la lettre de la réduction de 50% conduirait à l'abandon de très nombreux projets, de sorte que les prévisions de consommation sont deux à trois fois plus fortes que la consommation passée. L'hétérogénéité de la mesure, la contestation des chiffres, la production d'indicateurs alternatifs ouvrent finalement l'espace nécessaire à l'application de la loi, mais une reconstruction du taux de réduction atteint en 2031 sera probablement nécessaire. L'évaluation de cette première phase du ZAN sera d'autant plus délicate que la méthode de mesure du phénomène changera considérablement à cette date.

Appréhender les dimensions géographiques de l'alerte par diffusion cellulaire en France : une question spatiale, mais pas seulement !

Johnny Douvinet, Géographie, Avignon Université, UMR ESPACE 7300 CNRS

Esteban Bopp, Géographie, Université de Lille, ULR 4477 TVES

Johnny.douvinet@univ-avignon.fr, esteban.bopp@univ-lille.fr

Introduction

Techniquement fonctionnelle depuis début juin 2022 en France, l'alerte par diffusion cellulaire consiste à envoyer une notification sur les écrans des téléphones portables des individus situés dans une zone de danger, définie spatialement par les autorités. Cette innovation a des incidences spatiales évidentes, et à ce titre, notre regard de géographe a permis de montrer l'existence d'inégalités d'alertabilité entre les territoires, ou des effets de « sur-alertes », qui sont notamment liés à la répartition et à la densité des antennes des opérateurs. Mais l'appréhension de l'alerte par diffusion cellulaire doit aussi intégrer d'autres dimensions géographiques (la temporalité de l'événement, les caractéristiques des territoires dans lesquels sera diffusée l'alerte...), et être regardée avec d'autres disciplines. De ces collaborations sont d'ailleurs nés des protocoles expérimentaux inédits, qui ont conduit à l'émergence de nouveaux résultats, sur l'influence de la nature du danger sur les déclarations de mise en sécurité des individus sollicités au cours d'exercices, ou sur la nature des réactions produites selon les mots utilisés. Au-delà d'une expertise et de savoir-faire reconnus, il est finalement intéressant de réfléchir à la spécificité de « notre regard de géographe » : que dit-on de nouveau (ou de différent) par rapport aux autres ? Est-ce par la nature des outils, des méthodes, des données ou des réflexions que nous nous distinguons ? Et de façon plus englobante, quels défis doivent relever les géographes pour théoriser les composantes géographiques d'une telle innovation et accompagner le changement de paradigme qu'elle présuppose (car le signal d'alerte historiquement sonore est devenu textuel et audible par un plus grand nombre) ?

Quelques rappels techniques

L'alerte par diffusion cellulaire se traduit par la réception d'une notification sur l'écran du téléphone (**Figure 1**), associé à un son sonore « intrusif » si le niveau d'alerte choisi est élevé (Aloudat et al., 2014 ; Bean, 2019 ; Olson et al., 2023). Pour une question de coût, seuls les téléphones raccordés à un réseau de téléphonie en 4G ou 5G peuvent actuellement supporter la réception en France. La diffusion se fait sous la forme d'ondes radio diffusées autour des antennes des opérateurs de téléphonie mobile. On parle ici d'une couverture « surfacique ». Contrairement aux SMS, la diffusion n'est pas sujette à un risque de congestion sur les réseaux : les ondes diffusent sur un canal spécifique, qui peut toucher des millions de personnes dans un délai de deux à trois secondes (Douvinet et al., 2022).

Une technologie à questionner sous l'angle des spatialités

Afin d'identifier les inégalités spatiales produites par cette technologie, une méthode a été testée, puis généralisée sur l'ensemble des communes de la métropole et des outre-mer (Bopp, 2021). Un taux de connectivité (*i.e.*, le nombre de résidents estimés vivant dans les zones de couverture des opérateurs) a été croisé avec un taux d'équipement (*i.e.*, le nombre d'habitants possédant un smartphone, estimé d'après les tranches d'âge et les données issues du CREDOC, 2018), pour finalement aboutir à un taux d'alertabilité. D'après les résultats, en juin 2019, la diffusion cellulaire permettrait d'alerter 81,3% des résidents dans l'Hexagone. Dans les DROM et PTOM, les écarts sont un peu plus marqués, et les valeurs moyennes plus faibles (74% en Martinique, 78% à la Réunion). Cette technologie est source d'inégalités spatiales : une autocorrélation des taux d'alertabilité est observée en France Hexagonale, avec de nets écarts entre les pôles urbains et les territoires ruraux, où l'habitat est bien plus dispersé (Bopp, 2021). En réactualisant les données, de nouvelles estimations ont été faites en 2023 révélant une atténuation des disparités spatiales, grâce à une amélioration de la couverture 4G et 5G par les opérateurs (Douvinet et al., 2023).



Figure 1. Exemples de notifications d’alerte par diffusion cellulaire, envoyées durant trois exercices ayant été organisés durant l’année 2022 en France (Douvinet©2024).

D’autres travaux plus récents ont montré que les zones de « sur-alerte » (effets de bord) peuvent être importantes, en particulier dans les zones rurales ou de montagne, autrement dit quand la densité des antennes est faible. Les algorithmes utilisés pour la diffusion cellulaire sont aussi propres aux antennes de chaque opérateur (Bopp et al., 2024). Dès lors, la zone dessinée par les autorités ne correspond pas forcément à l’emprise effective de la diffusion cellulaire, d’autant que certaines antennes peuvent être en maintenance (ne diffusant pas le signal). Les deux cartes ci-dessous montre ces effets de sur-alerte, les notifications ayant parfois été reçus à plus de 15km de la zone souhaitée (**Figure 2**).

Effets de débordement de la diffusion cellulaire
(exercice industriel organisé le 13 octobre 2023)

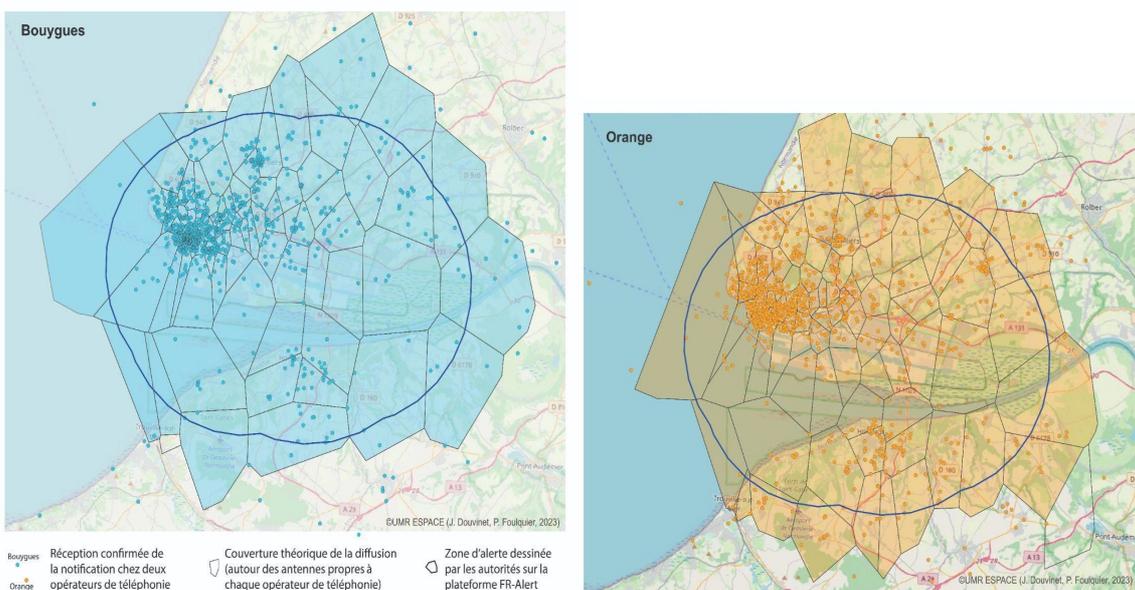


Figure 2. Comparaison entre la zone d’alerte dessinée par les autorités et la cartographie théorique de la réception (les points indiquant une réception du message), confirmant des effets de bord (Douvinet©2023).

Un objet « complexe » à aborder dans d'autres dimensions géographiques

L'appréhension de l'alerte par diffusion cellulaire ne doit pas se limiter à en étudier les incidences dans et par l'espace. D'autres dimensions sont ainsi à aborder avec un regard éminemment géographique : 1) une dimension temporelle (à quel moment alerter ? comment alerter « ni trop tôt, ni trop tard » ?), 2) une dimension territoriale (comment les caractéristiques des espaces alertés peuvent jouer un rôle dans l'efficacité de la diffusion?), 3) une dimension sociale (quels messages formaliser pour espérer une mise en sécurité réflexe voire immédiate face à certains dangers ?) voire même 4) une dimension environnementale (comment considérer les liens entre les éléments naturels et les sociétés dans le contexte de changements globaux actuels ?).

La mise en relation de ces dimensions invite à envisager une démarche holistique. La conceptualisation d'un système d'alerte a ainsi permis de détecter les interactions entre les différentes dimensions, voire d'identifier des structures récurrentes (Bopp et al., 2021). A ce titre, l'alerte par diffusion cellulaire doit être vue comme une nouvelle technologie qui s'inscrit dans un système global (national), et qui doit tenir compte d'enjeux organisationnels, structurels, techniques et opérationnels qu'il convient de bien mesurer (Bopp, 2021). Ces enjeux sont communs à d'autres systèmes (l'alerte par diffusion cellulaire ayant été déployée depuis 2007 au Japon, 2011 aux Pays-Bas, 2012 aux USA...). Pour autant, cette technologie nécessite une adaptation propre à chaque pays. La France a fait le choix de combiner la diffusion cellulaire à l'alerte par sirènes, à l'alerte par SMS-géolocalisés (fonctionnelle depuis début décembre 2023), et envisage même l'alerte par satellites (2025), utile en cas de coupure de courant ou panne sur les réseaux de télécommunication. A l'inverse, d'autres pays ont choisi de déployer de façon unitaire tel ou tel outil. La critique étant néanmoins qu'une personne pourrait recevoir une alerte via ces différents canaux à plusieurs reprises, accentuant le caractère anxiogène de l'alerte.

En quoi ce regard est-il nouveau (ou différent) des autres ?

Certains de nos questionnements sont proches de ceux qui sont posés dans d'autres sciences sociales, en particulier sur les relations entre sciences et société, qui émergent dans le débat public depuis une vingtaine d'années. Le regard du géographe reste néanmoins atypique par rapport aux autres, comme nous avons pu le constater au cours des projets menés sous contrat, pour trois principales raisons : 1) nous avons placé le territoire au centre du système, ce qui permet de s'affranchir d'une entrée techniciste ou uniquement opérationnelle (Bopp et Douvinet, 2022) ; 2) les outils de la géographie quantitative (notamment l'analyse spatiale et les outils de modélisation), permettent de modéliser les effets spatiaux (*jusqu'où le message a été diffusé ?*), à défaut d'avoir les données issues des opérateurs (qui conservent ces informations pour des questions de concurrence, voire de responsabilité si l'alerte n'aurait pas été diffusée) ; 3) La mobilisation d'un cadre d'analyse dans les différentes dimensions permet de mieux cerner l'ensemble des processus induits (générés) ou subis (provoqués) par l'alerte par diffusion cellulaire, et de proposer des restructurations organisationnelles dans une optique plus prescriptive.

Un autre apport est d'ordre méthodologique. En multipliant les protocoles, les outils et les indicateurs dans les différentes dimensions, nos pratiques en géographie ont permis de comparer nos observations empiriques à des cadres plus normatifs (*théorie*), et de confronter les usages (*observés*) à un potentiel d'utilisation (*généralisable*). Les aller-retours entre des approches descriptives (*comment ça marche ?*), des approches inférentielles (*un tel argument est-il (ou non) prouvé ?*) et des approches modélisatrices (*comment ce que j'observe est généralisable ?*), ont permis une théorisation progressive de l'alerte par diffusion cellulaire. Cette posture méthodologique permet aussi d'adopter une démarche critique vis-à-vis de cette innovation. Ainsi, c'est moins le monde artificiel et technologique du fonctionnement de l'alerte par diffusion cellulaire, que le rapport qu'entretiennent les êtres humains avec leurs territoires (de vie ou de travail), et les interactions qu'ils ont ou qu'ils auraient avec leur environnement en cas d'alerte réelle qui intéresse les géographes de l'alerte (Douvinet et al., 2023).

Passer de la mesure à la théorie : une question ambitieuse

L'enjeu est à présent de parvenir à théoriser une territorialisation de l'alerte par diffusion cellulaire. Nous pensons qu'il est possible d'identifier des lois géographiques dans le recours aux technologies d'alerte par diffusion cellulaire. Les prochaines pistes à explorer sont la modélisation du triptyque « aléa-alerte-évacuation ». Le développement d'un modèle par automate cellulaire est une piste envisagée. La seconde grande piste à explorer est la modélisation des zonalités spatiales de crise et d'alerte, en s'appuyant sur des approches multi-scalaires, et la théorie des sous-ensembles flous. Aussi, nous pensons que l'usage des innovations technologiques par les politiques publiques et/ou par les citoyens font émerger des processus spatiaux (et non-spatiaux) théorisables et donc modélisables. Dans tous les cas, le recours à d'autres disciplines reste nécessaire car la géographie n'aborde qu'une partie d'un système beaucoup plus complexe. Calculer une probabilité de réception (en fonction de la distance à une antenne par exemple) ne présage par exemple pas de la manière dont les citoyens vont réagir en temps réel. Plus globalement, d'autres outils que la diffusion cellulaire sont venus modifier la manière de gérer les risques, les crises et l'alerte sur les territoires depuis le début du XXI^{ème} siècle. On peut penser aux réseaux sociaux numériques ou aux applications smartphones qui ont apporté de nouvelles méthodes de prévention, d'alerte et de communication de crise. On peut aussi penser aux systèmes d'alerte précoces, dont les réseaux de capteurs ont permis une meilleure détection des aléas et alerte montante. Les outils numériques s'appuyant sur l'intelligence artificielle et/ou les outils de réalité virtuelle/augmentée apportent aussi de nouvelles perspectives en matière de mise en situation, de visualisation prospective ou de scénarisation. Ces démarches comportent des dimensions spatiales, mais aussi des limites qui ne sont pas toujours bien évaluées dans un contexte où la politique nationale a une vision très techno-centrée des problématiques environnementales.

Bibliographie

- Aloudat A., Mickael K., Chen X., Al-Debei M.M. (2014). Social acceptance of location-based mobile government services for emergency management. *Telematics and Informatics* 31(1), pp.153-171. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2013.02.002>.
- Bean H. (2019). *Mobile technology and the transformation of public alert and warning* (1st ed.) Praeger Security International.
- Bopp E., Douvinet J., Carles N., Foulquier P., Péroche M. (2023). Spatian (in)accuracy of cell broadcast alerts in urban context: Feedback from the April 2023 Cannes tsunami trial. *Computers, Environment and Urban Systems* 107. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.102055>.
- Bopp E., Douvinet J. (2022). Alerting people prioritising territories over technologies. A design framework for local decision makers in France. *Applied Geography* 146, 102769, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102769>.
- Bopp E. (2021). Evaluation et spatialisation du potentiel offert par les moyens d'alerte centrés sur la localisation des individus Expérimentations à différentes échelles en France. Thèse. Avignon Université <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03266846>.
- Bopp E., Gisclard B., Weiss K., Martin G., & Douvinet J. (2021). How to improve alert systems: The technical, human, environmental and structural aspects. *The Australian Journal of Emergency Management*, 36(1), 67–75. <https://doi.org/10.3316/agispt.20210525047171>.
- Douvinet D., Bopp E., Vignal M., Foulquier P., César A. (2023). Quand la recherche accompagne les acteurs de l'alerte institutionnelle en France : entre science, expertise et médiation. *Annales de Géographie* 2023/5, pp41-63, <https://doi.org/10.3917/ag.753.0041>.
- Douvinet J., Cavalière C., Bopp E., Weiss K., Emsellem K., Gisclard B., Martin G., Coulon M. (2022). Evaluer la perception de notifications d'alerte scénarisées dans différents scénarios en France : Enjeux et perspectives. *Cybergeog*, <https://doi.org/10.4000/cybergeog.39454>.
- Olson M.K., Sutton J., Cain L.B., Waught N. (2023). A decade of wireless emergency alerts: A longitudinal assessment of message content and completeness. *Journal of Contingencies and Crisis Management*. <https://doi.org/10.1111/1468-5973.12518>.

Intelligence géospatiale maritime et sciences de l'espace géographique : regards croisés

Anne Duverger, Cyril Carré, Cyril Ray, Jean-Marie Kowalski

Institut de recherche de l'École navale

anne.duverger@ecole-navale.fr, cyril.carre@ecole-navale.fr, cyril.ray@ecole-navale.fr,

jean-marie.kowalski@ecole-navale.fr

Résumé

L'intelligence géospatiale a pris son essor dans le domaine terrestre et ne se tourne que marginalement aujourd'hui vers les problématiques maritimes. Pourtant, la compréhension des espaces maritimes est une nécessité pour nos sociétés modernes tant ils sont une clé de perception des enjeux commerciaux, sociétaux ou géopolitiques contemporains. L'étude des activités et des mobilités maritimes - libres par essence - est un des moyens d'appréhender cet espace. Les volumes de données décrivant ces mobilités sont croissants, fluctuants ; l'analyse de ces données spatio-temporelles au profit, par exemple, de la surveillance des câbles internet sous-marins, du suivi des pêches, ou des pollutions nécessite une démarche d'étude complémentaire entre l'ingénierie de l'information géographique, les sciences des données et les sciences humaines et sociales. Dans cet article, les capacités pluridisciplinaires d'interprétabilité des mobilités, des comportements et des situations maritimes sont développées. Historiens, géographes, informaticiens, géomaticiens et usagers du monde maritime sont donc associés, ce qui soulève des questions sur les liens entretenus entre ces disciplines, en particulier la géographie, et l'intelligence géospatiale ; et ce du point de vue conceptuel, méthodologique et des outils mobilisés.

Mots-clés : intelligence géospatiale - espaces maritimes - géographie - sciences des données - AIS

« La géographie est d'abord un savoir stratégique, étroitement lié à un ensemble de pratiques, politiques et militaire, et ce sont ces pratiques qui exigent le rassemblement articulé de renseignements extrêmement variés, au premier abord hétéroclites »

(Lacoste, 1976 : 57)

Introduction

Nous avons assisté à un mouvement de territorialisation continu de l'espace maritime (Miossec, 2014 : 11). Ce terme¹ que l'on peut assimiler à la volonté et/ou l'action de « faire territoire² », malgré les particularités de l'espace maritime (étendue, mouvements, profondeur et fluidité) (Drish, 2015 : 130), reflète ses réalités. En effet, comme l'espace terrestre, les mers et océans

¹ Absent des dictionnaires de géographie (Wossner, 2010 : 671), le terme recouvre « l'ensemble des actions, des techniques et des dispositifs d'action et d'information qui façonnent la nature ou le sens d'un environnement matériel pour le conformer au projet territorial » (Debarbieux, 2009 : 85-86)

² Si le terme est polysémique, ici, il renvoie à un espace approprié (maillage, vécu, projections...des Hommes) (Brunet *et al.*, 1993 : 480-481)

sont de plus en plus délimités (la CNUDM³ est entrée en vigueur en 1994), appropriés (maritimisation, exploration...) ; cela génère de nouvelles conflictualités (ZEE⁴ en litige, exploitation de ressources naturelles, pose de câbles sous-marins...) engendrant un besoin accru de gestion de l'information maritime. C'est pourquoi un projet relatif à l'intelligence géospatiale (GEOINT) maritime, financé par l'Agence de l'innovation de la défense (AID) a été lancé au sein de l'Institut de Recherche de l'École navale.

En effet, l'intelligence géospatiale s'est jusqu'à présent concentrée sur des enjeux terrestres et s'est peu saisie des problématiques liées au milieu maritime. Dans les pays anglo-saxons, l'intelligence géospatiale universitaire s'est penchée sur la gestion de crise⁵, la planification et l'aménagement des espaces urbains et péri-urbains, la gestion de l'environnement⁶ et son développement au sein des armées. En France, s'il existe une littérature relativement abondante sur l'histoire de l'intelligence géospatiale, les recherches utilisant cette dernière comme cadre d'analyse n'existent pas ou peu⁷.

Ainsi, dans le cadre de ce projet, nous étudions l'élaboration d'une méthode propre à l'intelligence géospatiale maritime. Ces travaux appliqués soulèvent des questions théoriques pour les chercheurs, principalement du point de vue des sciences humaines et sociales, mais aussi pour les sciences des données. Le présent développement propose donc une réflexion sur les liens entretenus entre la géographie et l'intelligence géospatiale, et ce, du point de vue conceptuel, de la méthode et des outils mobilisés.

Dans un premier temps, nous reviendrons sur l'émergence de l'intelligence géospatiale maritime et l'apport de la géographie à cette démarche. Puis, nous mettrons en évidence que le volume des données intégrées contribue à son autonomisation vis-à-vis de la discipline géographique. Enfin, quelques similitudes et divergences entre géographie et intelligence géospatiale seront développées.

1 L'intelligence géospatiale est issue de la géographie militaire

« Nul ne peut contester que cette potentialité stratégique du savoir géographique a constitué à toutes les époques une de ses raisons d'être » (Bavoux, 2009 : 233).

1.1 L'émergence de l'intelligence géospatiale

Jusqu'au XIX^e siècle, il existe une relation implicite entre la géographie et le fait militaire sans que se dégage pour autant une pensée géographique militaire (Boulangier, 2006 : 10). En effet, les origines de la géographie militaire sont relativement récentes, en France elle se structure à partir de la défaite de 1870. Dans les années 1930, elle connaît une crise profonde et décline au lendemain de la Seconde Guerre mondiale (Regnier 2008 : 121-127). Cette dernière n'a pas suivi le tournant qu'a pris la géographie ; à savoir le développement de la géographie culturelle, démographique ou sociale.

Durant la guerre froide, la géopolitique et la géostratégie vont s'imposer comme véritable géographie du fait militaire. Il en est différemment depuis les années 1990 dans les pays anglo-

³ Convention des Nations unies sur le droit de la mer, signée en 1982 à Montego Bay (Jamaïque).

⁴ Zones économiques exclusives

⁵ Risques naturels, aide humanitaire, frontières, trafic de drogue.

⁶ Déforestation, pollution de l'air, analyse de glaciers.

⁷ Les deux thèses francophones répertoriées sur ce thème traitent du développement de l'intelligence géospatiale dans la gendarmerie (Lucazeau, 2018) et pour le Japon (Mourton, 2022).

saxons, où l'on assiste à un retour d'une géographie militaire de synthèse intégrant tous les composants géographiques. Par exemple, les congrès de l'*Association of American Geographer*, favorisent l'essor d'une réflexion approfondie sur les expériences militaires passées, mais aussi sur les opérations de maintien de la paix dans le monde. En somme, le renouvellement de la géographie militaire est un phénomène récent (Boulanger, 2006 : 18-19, 25-26).

Ainsi, tandis que la réflexion géographique militaire s'est appauvrie en Europe, elle a connu un essor progressif aux États-Unis pour répondre à la défense des intérêts américains dans le monde. En 1991, l'Agence nationale de l'imagerie spatiale et cartographique (*National Imagery and Mapping Agency*) favorise l'emploi d'un concept nouveau : GEOINT/l'intelligence géospatiale. Elle est absorbée en 2003 pour former la *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA) consacrée à la production et à la diffusion des données géographiques et spatiales pour l'armée américaine (Boulanger, 2016b : 158-159).

Puis, au début des années 2000, l'intelligence géospatiale va se diffuser. Le NATO *Intelligence Fusion Center* est créé en 2005 (opérationnel en 2007) sous la tutelle des États-Unis. Cette dernière relève du comité militaire de l'Alliance atlantique. Installé sur la base de la *Royal Air Force* de Molesworth en Angleterre, il dépend du commandement opérationnel du SACEUR (*Supreme Allied Commander Europe*) et « applique en conséquence la même doctrine que celle de la NGA » (Boulanger, 2020 : 268-269). Si, l'OTAN s'appuie sur la définition des Américains, en son sein, les significations sont variables selon les nations (Kovarick, 2012 : 1).

L'intelligence géospatiale est aujourd'hui « un attribut de toute-puissance et de toute représentation de puissance, d'abord pour les États occidentaux, ensuite pour les pays émergents » (Boulanger, 2021 : 35). En France, elle apparaît concrètement dans la transformation lancée en 2014 par le directeur du renseignement militaire, le général Gomart. Ainsi, la création du Centre de renseignement géospatial interarmées (CRGI) au sein de la DRM⁸ en 2014 a marqué le lancement de la première structure consacrée à cette discipline (Morisseau, 2018 : 93).

1.2 Approche conceptuelle de l'intelligence géospatiale

La NGA définit l'intelligence géospatiale « comme l'exploitation et l'analyse d'images et d'informations géospatiales pour décrire, évaluer et représenter visuellement des caractéristiques physiques et des activités géographiquement référencées sur la Terre. Le GEOINT se compose d'imagerie⁹, de renseignement d'origine image¹⁰ et d'informations géospatiales » (NGA, 2006 : 5 ; 2018 : 3). L'intelligence géospatiale est aussi définie comme une technique de renseignement qui se veut multi-sources : elle intègre et enrichit les informations collectées par les autres disciplines du renseignement¹¹. La fusion de ces sources

⁸ La Direction du renseignement militaire est responsable du renseignement militaire et d'intérêt militaire pour l'ensemble des forces armées françaises.

⁹ Soit les images produites par des satellites ou des engins aériens avec ou sans pilote (NGA, 2018 : 3).

¹⁰ Soit les informations dérivées de l'interprétation ou de l'analyse des images (NGA, 2018 : 3).

¹¹ Le renseignement humain, l'intelligence des signaux qui regroupe l'intelligence électronique et l'intelligence des communications ; le renseignement de mesure et de signature, l'intelligence de l'imagerie (Bacastow, 2023 : 1). La NGA inclut aussi les informations accessibles au public qui sont collectées (NGA, 2018 : 16).

a deux finalités : la prise de décision et l'anticipation. Elle a « *la capacité de décrire, de comprendre, et d'interpréter pour anticiper l'impact humain d'un événement ou d'une action dans un environnement spatio-temporel* » (Bacastow, Bellaïfiore, 2009 : 38-40).

En France, l'intelligence géospatiale est définie comme contribuant « *à l'autonomie d'appréciation de situations grâce à la fusion et à l'analyse de données géolocalisées de sources variées (...)* » (Ministère des Armées, 2019 : 19) et doit permettre « *une vision géographique de tous ses leviers de manœuvres et contraintes (ressources humaines, logistique, renseignement, open data). Par ailleurs, pour la gestion d'interventions, de grands événements ou de crises, la cartographie doit servir de support à la visualisation des données en temps réel afin de faciliter la prise de décision (...)* » (Ministère de l'Intérieur, 2020 : 233). En effet, la géovisualisation est un outil essentiel du processus d'intelligence géospatiale, car en exploitant des éléments connus, elle permet de mettre en évidence des éléments inconnus (Caillard, 2016 : 187). En ce sens, les systèmes d'information géographique (SIG) deviennent les outils privilégiés, car en regroupant les sciences de l'observation (acquisition et traitement de données, analyse), ils contribuent à modéliser les phénomènes spatiaux pour comprendre les relations spatiales et en prédire les évolutions (Majerowicz, 2016 : 200).

L'intelligence géospatiale ne se limite pas à un processus technique, mais elle : « *s'élargit à l'idée de raisonnement et d'analyse relevant du domaine de la géopolitique en sciences humaines (...)* » (Boulanger, 2019 : 32). Son objectif vise donc à une géopolitique opérationnelle grâce à la cartographie traditionnelle et numérique, aux sciences géodésiques¹², aux SIG, à l'imagerie spatiale, aux données liées à chaque milieu physique (aéronautique, terrestre, maritime), à l'analyse géopolitique, aux sources du renseignement (humain, électromagnétique, cyber, sources ouvertes, géospatial et informatique) à partir de tous les capteurs utilisables (drones, satellites, senseurs divers) (Boulanger, 2020 : 245). Ainsi, l'intelligence géospatiale « *restitue l'essence même de la géographie militaire qui se veut une discipline de synthèse (géographie humaine, géographie physique). Mais y ajoute la notion de performance de l'analyse dans un délai court et celle de la qualité de l'information par la fusion de différents supports et l'apport de différentes technologies de visualisation* » (Boulanger, 2016b : 164).

L'intelligence géospatiale française se distingue donc partiellement de celle américaine. Cette dernière met davantage l'accent sur le renseignement d'origine satellitaire et d'origine image en raison de leur supériorité dans ce domaine, alors que la première combine : « *imagerie satellitaire, signaux électromagnétiques et analyse en géographie humaine* » (Guerin, 2021 : 81). En effet, si dans la culture française du renseignement et de la géographie militaire « *la géographie physique a longtemps dominé l'intérêt des géographes des armées tandis que la géographie humaine était plutôt réservée au milieu universitaire* », depuis 2014 le directeur de la DRM, a créé une synergie entre le renseignement, l'imagerie spatiale et la géographie humaine¹³. D'autres éléments sont communs à ces deux approches de l'intelligence géospatiale (française et américaine) : la fusion des données, sa vocation opérationnelle et prédictive (pour la stratégie et la tactique), sa dimension spatio-temporelle et les SIG qui en sont les outils privilégiés.

¹² La géodésie est la science qui étudie les dimensions et la forme de la Terre. Institut nationale de l'information de l'information et forestière, Géodésie [en ligne].

¹³ Geointblog, Morisseau Jean-Philippe, Quelques questions sur le GEOINT [en ligne].

2 L'intelligence géospatiale maritime et le tournant du *big data*

En mai 2016, le directeur de la NGA indiquait que son agence était dotée d'un fonds de plus de 20 millions d'observations. Il précise que ce dernier s'agrandit par « *centaines de milliers chaque mois et s'accompagne de milliards de coordonnées géographiques* » (Van Puyvelde, 2017 : 226).

2.1 Les caractéristiques de l'intelligence géospatiale maritime

Les travaux du CICDE¹⁴ en 2021 nous permettent d'identifier une partie des composants caractérisant l'intelligence géospatiale maritime : elle exploite du renseignement multisources ; c'est une approche globale qui permet la contextualisation des données issues de toutes sources ; les données sont exploitées dans des SIG et *via* des procédés d'automatisation de calculs ; elle engendre l'analyse prédictive et l'anticipation ; elle est essentielle à la planification ; elle est assimilable à un système d'information, car elle autorise la collecte, le stockage, le traitement et la distribution de l'information ; enfin, elle structure des flux d'informations provenant d'acteurs privés ou institutionnels.

Cependant, en raison des spécificités du milieu maritime : « *les mers et les océans sont par essence des espaces physiques complexes et variés, différents de la terre et caractérisés par leur étendue (71 % de la surface du globe), leurs mouvements (courants, marées, houles...), leur profondeur (espace en trois dimensions : surface, colonne d'eau, sol et sous-sol) et leur fluidité* » (Drisch, 2015 : 130), il faut ajouter deux éléments (Duverger, Ray, 2024 : 3) :

- Le « *renseignement multisource* » est issu de quatre dimensions du milieu maritime : la surface, la colonne d'eau, le plancher océanique et l'espace. Sur les mers et océans (surface), certains navires sont dotés de systèmes de localisation : *Automatic Identification System* (AIS¹⁵), *Vessel Monitoring System* (VMS) qui est un système de surveillance des navires de pêche ou encore *Voyage Data Recorder* (VDR) qui est un enregistreur de données du voyage. En surface, on peut également collecter des données issues du renseignement humain, des caméras des ports et des RADAR¹⁶. Les données des bathysondes, SONAR¹⁷, des drones sous-marins et DAS¹⁸ concernent l'environnement maritime immergé. Enfin, les satellites se déplaçant au-dessus de l'espace maritime sont une source de données importante.
- L'anisotropie¹⁹ de l'espace maritime est moins importante que celle de l'espace terrestre ; il existe moins de structures de surface sur lesquelles s'appuyer pour caractériser une situation. C'est pourquoi des informations issues d'au moins deux dimensions sont souvent nécessaires à l'analyse.

¹⁴ Centre interarmées de concepts, de doctrines et d'expérimentations

¹⁵ L'AIS est obligatoire pour tous les cargos de 500 tonneaux ou plus, pour les navires d'une capacité de 300 tonneaux ou plus en service à l'international ainsi que pour tous les navires de passagers quelle que soit leur taille (IMO, 2020 : 318).

¹⁶ *Radio detection and ranging*, détection et estimation de la distance par ondes radio

¹⁷ *Sound Navigation and Ranging*, système de navigation et de télémétrie par écho sonore

¹⁸ *Distributed Acoustic Sensing*, système de détection acoustique distribuée

¹⁹ L'anisotropie caractérise un espace orienté, qui s'ordonne selon des axes, qui obéit à des polarisations Tabarly, 2005, Isotropie et anisotropie [en ligne] ; il n'existe pas d'espace géographique isotrope.

Ainsi, l'intelligence géospatiale maritime peut se définir comme une méthode d'analyse qui permet d'acquérir des connaissances par la fusion de toutes ou une partie des données acquises dans les quatre dimensions du milieu maritime. Certaines d'entre elles sont particulières au milieu maritime, notamment les données AIS (principal moyen de localiser les activités et mobilités humaines sur l'ensemble des mers et océans). Ces dernières représentent un volume d'informations important, elles nécessitent donc des systèmes de stockage adaptés et doivent être nécessairement traitées par des algorithmes pour pouvoir être représentées. Il est ensuite possible de les transférer dans un SIG, afin de les spatialiser et de procéder à la production de cartes. D'autres types de représentations (graphiques et schémas) permettent d'enrichir la compréhension de la dimension temporelle de l'information.

2.2 Un volume massif de données maritimes...

L'intelligence géospatiale maritime s'appuie sur un volume massif de données provenant notamment du système AIS. Ainsi, environ 400 000 navires, à l'échelle mondiale, transmettent toutes les 2 secondes à 3 minutes des informations statiques (nom du navire, pavillon, dimensions) et dynamiques (position, vitesse, cap) (ITU-R, 2014 : 9, 84). Par conséquent, ce système est représentatif des problématiques liées au *big data*, notamment :

- Le volume, qui se réfère à la quantité de données, trop abondantes pour être acquises, stockées, traitées, analysées et diffusées par des outils standards. Une journée de messages AIS à l'échelle mondiale représente environ 9 giga-octets de données brutes au format NMEA²⁰.
- La vélocité. Il s'agit de la vitesse à laquelle les données sont diffusées et la vitesse à laquelle elles changent ou sont actualisées (environ 10 000 messages par seconde à l'échelle européenne).
- La variété est relative à l'hétérogénéité des données (natures, sources et formats) (Doug, 2021 : 1). Au-delà de l'AIS, une étude relevant de l'intelligence géospatiale nécessite également une grande variété de couches de données complémentaires : liste de navires, conditions météorologiques, état de la mer, ressources sous-marines, infrastructures humaines (plateforme offshore, câbles sous-marins...).
- La véricité est un problème intrinsèque à l'AIS. S'agissant d'un système ouvert, en partie renseigné manuellement, les erreurs et malversations qu'il véhicule sont nombreuses (Ray *et al.*, 2015 : 3-5). Elle recouvre deux sortes d'erreurs. La première fait référence à la qualité des données : simples anomalies dues à la nature ou à l'acquisition de celles-ci (valeurs aberrantes ou manquantes, doublons, etc.). La seconde concerne leur manipulation délibérée : falsification, piratage (Iphar *et al.*, 2016 : 2). Pour ces raisons, en fonction des analyses à effectuer, il convient de mettre en place des processus de traitement des données adaptés.

2.3 ...qui nécessite la mobilisation de différentes disciplines

Face à ce volume massif de données, l'intelligence géospatiale fait appel à différentes disciplines, tant dans le domaine technologique que dans les champs des sciences humaines (Morel, Boulanger, 2016 : 193). Dans notre approche sur le GEOINT maritime, géographe, historien, géomaticien et informaticien, par une approche réflexive, identifient les compétences

²⁰ Les trames NMEA sont des messages standardisés permettant de transmettre des informations entre équipements marins.

prises en jeu par cette démarche. Le schéma ci-dessous (cf. fig. 1) synthétise les rôles des différents acteurs du projet, cependant leur répartition peut varier en fonction des profils et des compétences de chacun.

Le géographe et l'historien utilisent une méthode qualitative, cette dernière est adaptée pour comprendre des phénomènes qui sont difficilement mesurables (Mucchielli, 2009 : 205-206) et est utilisée pour les étapes préliminaires et finales du projet. Elle a permis, *via* un état de l'art, d'identifier les objets de connaissance de l'intelligence géospatiale maritime ; de délimiter la zone d'étude, d'élaborer une problématique de recherche, d'identifier des cas d'étude : le premier de ces cas est relatif à la sécurité des câbles internet sous-marins. En outre, cette démarche a été mobilisée pour sélectionner au sein des données quantitatives les éléments nécessaires à la confirmation ou à l'infirmité des hypothèses de recherche (type de navires, pavillons...), ainsi qu'à identifier les données contextuelles à ajouter dans le SIG (ZEE, eaux territoriales, mers et océans du monde, administratives, zones portuaires, l'IDH des pays...), nous renseignant sur l'environnement maritime, juridique, physique, géopolitique dans lequel s'inscrivent les câbles.

L'approche qualitative est aussi nécessaire pour avoir une vision holistique d'un phénomène : pour mesurer les risques pesant sur les câbles sous-marins, un indice comportant une variable liée au contexte géopolitique du câble est développé (Duverger, Ray, 2024 : 12). Enfin, elle est incontournable pour l'analyse des résultats, car des éléments hétérogènes entrent en interaction (dans le cas des câbles, leur situation, le contexte géopolitique, la bathymétrie, les compagnies détenant les navires câbliers...). En ce sens, leur démarche est proche de celle du marin-analyste.

Géomaticien et informaticien interviennent dans les étapes médianes du projet. Le géomaticien est chargé de l'importation, du traitement et de l'analyse des données. Il participe également à la conception des différentes bases de données et à leur structuration. Il conçoit des modèles conceptuels répondant aux problématiques formulées par le géographe. Par conséquent, une connaissance approfondie des outils de la géographie est essentielle pour saisir les nuances et les implications des besoins exprimés par ce dernier. Cela lui permet de sélectionner les sources de données les plus pertinentes pour le cas d'étude, de penser avec le géographe le choix de la résolution des hexagones au regard du phénomène étudié. Lorsque les données sont chargées sur la plateforme (cf. fig. 1), il peut commencer à les traiter. Il passe ensuite à la phase d'extraction des informations. Une chaîne d'exploitation constituée d'algorithmes de traitement et d'analyse de données est mise en place. Les compétences mises en œuvre par le géomaticien sont triples : analyse spatiale, statistiques et développement informatique. Dans le cadre de l'intelligence géospatiale maritime, les données étant trop volumineuses et disparates pour être directement intégrées dans les logiciels SIG classiques, nous utilisons les technologies issues du *big data* pour les traiter (domaine de l'informatique) et la science des données pour extraire et synthétiser l'information. Une fois les informations pertinentes extraites, elles sont transférées au géographe : couches géographiques, tables et graphiques.

Dans le cadre du projet, le rôle de l'informaticien recouvre trois profils complémentaires. En tant qu'architecte *big data*, il est responsable de la conception et du développement de l'infrastructure informatique qui sous-tend l'ensemble du projet (mise en place de solutions

techniques pour la collecte des données, leur stockage et leur traitement). Il choisit les *frameworks* (infrastructures logicielles) et les structures de bases de données. En complément, l'ingénieur plateforme (informaticien) assume la fonction d'administrateur du système d'information. Sa mission est de maintenir en condition opérationnelle l'intégralité de la plateforme. Il est chargé de l'administration et de la maintenance de l'infrastructure informatique afin d'en garantir la sécurité, la performance et la disponibilité. Cela comprend l'installation et la configuration des serveurs et des logiciels, la mise en place de solutions de sauvegarde et de restauration des données, la gestion des accès des utilisateurs. Le troisième rôle est celui d'informaticien en science des données (*Data Scientist*). Il apporte son expertise en matière d'extraction, de structuration, d'analyse et de restitution des données. Son travail consiste à concevoir les traitements et algorithmes (notamment en ayant recours à l'intelligence artificielle) permettant de transformer les données brutes en connaissances exploitables. En ce sens, son champ d'action recoupe en partie celui du géomaticien. En collaboration avec ce dernier, il choisit les données pertinentes à partir des différentes sources, participe à l'importation et au nettoyage de celles-ci (formatage, suppression des erreurs, etc.). Il définit les règles de structuration des différentes bases de données et conçoit les modèles statistiques et d'apprentissage automatique pour détecter, classer et prédire des événements et ainsi identifier des risques potentiels. Le *Data Scientist* constitue une boîte à outils d'algorithmes et restitue les résultats de ses traitements sous forme de tables et tableaux de bord qui sont ensuite exploités par le géomaticien ou le géographe.

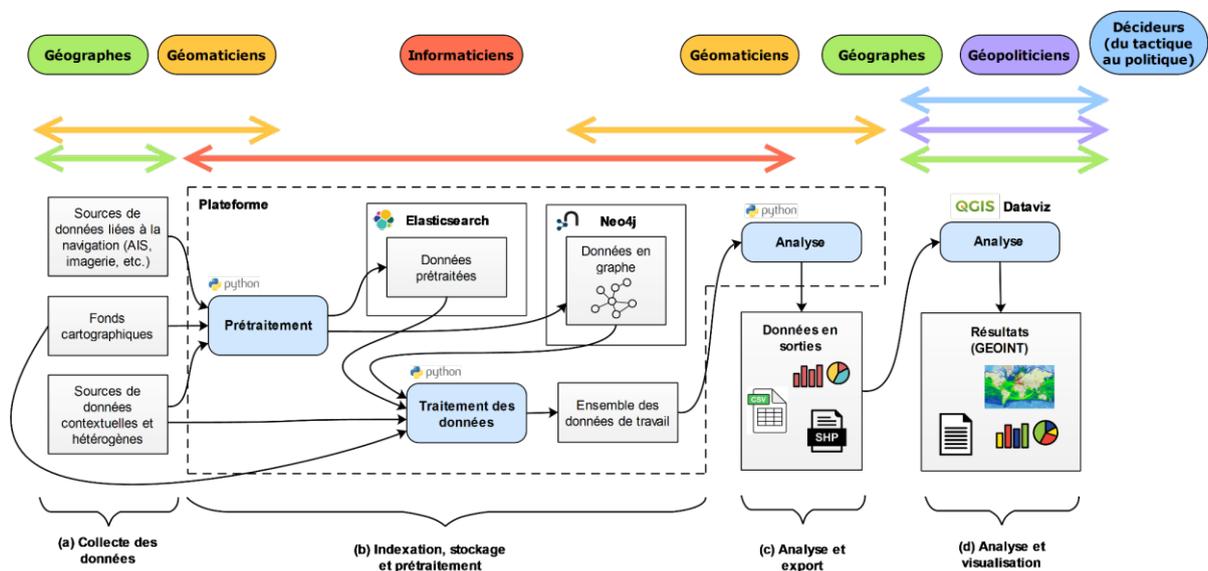


Figure 1 : une approche réflexive sur les disciplines impliquées dans une démarche relevant de l'intelligence géospatiale maritime

3 Intelligence géospatiale vs géographie, distinctions et apports mutuels

« L'essence même de la géographie, sa globalité (...) lui sera constamment reprochée ; au fond, savoir un peu de tout (la synthèse) tout en ayant l'ambition d'aller au plus profond de la connaissance du plus petit. Une affaire d'échelles que le géographe ne peut ignorer, mais avec lesquelles il peut jouer ! » (Miossec, 2021 : 81).

3.1 Une méthode proche de la géographie quantitative ?

La géographie s'est « très vite jetée dans la déferlante des big data car beaucoup de ces données (...) sont individuelles, ce qui intéresse toutes les sciences sociales, mais surtout elles sont très souvent géolocalisées (...) ». Ce type de données « conduirait (...) à transformer les bases épistémologiques du travail scientifique, en apportant un substitut à la démarche classique des enquêtes et des expériences » (Pumain, 2017 : 30-31). Pour certains, aux démarches inductives²¹ et hypothético-déductives²² de la géographie « devraient désormais s'articuler avec une troisième voie, non-exclusive, mais sans doute complémentaire : l'abduction » (Audart et al., 2014 : 3). Cette dernière renvoie « à la capacité du scientifique de se mettre en position d'étonnement à se laisser guider par la recherche de l'inattendu ».

Concrètement, ce processus repose sur l'exploration des données, de manière à faire germer des hypothèses. Puis, la déduction est employée pour évaluer les hypothèses générées au cours de cette phase, tandis que l'induction permet de les tester empiriquement (Banos, 2005 : 2-3).

Dans le cadre de notre projet, si le géomaticien dispose des compétences nécessaires à « l'exploration graphique interactive de données » (Banos, 2005 : 5) ; cette dernière n'est réalisable que pour un volume restreint de données (une grande échelle sur un temps relativement court). De plus, confronter une partie des « champs » de l' AIS revient à effectuer un choix ; supposer qu'un minimum deux variables produisent de la connaissance : c'est le début de la démarche hypothético-déductive. Par conséquent, dans le cadre d'une démarche qui intègre aussi bien les sciences formelles qu'humaines, nous avons choisi de formuler des hypothèses au regard des enjeux maritimes présents dans la zone d'étude. Ces hypothèses ont été construites en se basant sur la littérature spécialisée, les expériences de terrain du géographe (spécialiste de la Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu) et celles de militaires (entretiens ouverts). En effet, l'intelligence géospatiale accorde une large place au « renseignement humain » et donc à la pratique de terrain : « bien que les outils d'analyse de données massives permettent de définir certaines cibles et de mieux les surveiller, l'être humain continue de jouer un rôle essentiel d'interprétation et de jugement dans le cycle du renseignement » (Van Puyvelde, 2017 : 227). Puis, ces hypothèses ont déterminé les aspects du signal AIS à analyser (champs à sélectionner).

Ainsi, l'intelligence géospatiale maritime se sert des outils de la géographie quantitative (graphe du réseau maritime pour comprendre son évolution et celle des cycles de vie des navires, ainsi que de divers algorithmes : changement d'identité des navires, prédiction de trajectoire sont créés) (Maslek Elayam et al., 2021 : 1) (Duverger, Ray, 2024 : 8), tout en partant du terrain. C'est un reproche généralement fait par les détracteurs de la théorie quantitative : « elle apparaît le plus souvent « hors sol », trop déconnectée de la complexité du terrain et de la collecte des données de première main » (Feuillet et al., 2019 : 8). Cependant, ici, comme en géographie, elle tend « à se diluer (...) car son programme n'entre plus en collision avec les pratiques en vigueur : (...) [elle est] pratiquée à divers degrés dans la plupart des spécialités

²¹ La démarche inductive part de l'observation et de la description des faits pour aller vers l'explication (Beguin, 1985 : 65).

²² La démarche hypothético-déductive consiste à élaborer « une construction théorique des processus qu'elle présume explicatifs du monde réel et elle la confronte ensuite avec la réalité étudiée afin d'en vérifier la validité » (Bailly et al., 2016 : 19).

du champ géographique » (Cuyala, Commenges, 2014 : 305) car son « *son utilité (...) ne cesse d'augmenter, en lien avec la disponibilité croissante de l'information géographique* » (Feuillet *et al.*, 2019 : 13).

Ajoutons, que nous disposons d'une couverture mondiale de données AIS de 2017 à 2023. Il est donc possible de répliquer notre méthode de recherche, dans le temps et l'espace, en faisant varier la littérature à exploiter, les expériences de terrain à recueillir, pour cibler les aspects de l'AIS à exploiter au regard d'une situation donnée. Ce triptyque peut constituer les bases d'une démarche relevant de l'intelligence géospatiale maritime.

3.2 Représentations des territoires maritimes entre géopolitique et géostratégie ?

Afin de faciliter l'agrégation, la visualisation et donc l'analyse d'un grand volume de données, nous avons développé une approche basée sur le système d'indexation hexagonale Uber H3²³. Cette bibliothèque offre plusieurs avantages en termes de structuration de la donnée et de représentation. Pour commencer, la forme hexagonale subira moins de distorsion que les autres formes du fait de la courbure de la Terre (Malslek Elayam *et al.*, 2022 : 2).

De plus, elle contient 16 tailles différentes d'hexagones, chacune couvrant l'ensemble du globe : la maille 0 correspond à des hexagones d'une superficie moyenne de 4 250 546 km², la maille 15 à des hexagones d'une superficie moyenne de 0,895 m². Leur niveau de granularité, plus ou moins fin, permet donc de trouver un maillage adapté à toutes les échelles d'analyse, pour tous les phénomènes et avec un volume adapté de données. Les hexagones avec le maillage le plus important couvrent de vastes régions, tandis que ceux avec une résolution plus fine ne couvrent que des zones plus petites où ne se trouvent que quelques navires (Wang *et al.*, 2019 : 3).

Chaque hexagone est subdivisé en sept hexagones de taille inférieure²⁴. Ainsi, grâce aux diverses tailles d'hexagones, il est possible de mener des analyses multiscalaires²⁵ ; ils s'imbriquent parfaitement les uns dans les autres à tous les niveaux. Enfin, la représentation hexagonale favorise la restitution des mouvements des navires vers six directions équidistantes (contre quatre pour un maillage carré) (Tsatcha *et al.*, 2014 : 11) ; cela augmente les possibilités d'appréhension du comportement des navires.

Par conséquent, si les objets maritimes, par nature mobiles, évoluant dans un environnement fluide posent des difficultés de représentation, l'indexation hexagonale offre la possibilité de modéliser les trajectoires des navires, de mieux identifier et délimiter les zones d'intérêt (Malslek Elayam *et al.*, 2022 : 2). Ces éléments permettent de penser les mers et océans par le prisme du concept de « territoire » ou « merritoire »²⁶.

Dès lors, l'indexation hexagonale offre la possibilité de lier des approches relevant de la géographie, géopolitique et géostratégie, toutes trois basées sur l'analyse des territoires et une approche multiscalaire. En effet, la géopolitique se veut « *un discours (...) étayé par des observations de terrain, destiné à expliciter des enjeux de pouvoir sur des territoires, sans*

²³ Uber Technologies, H3-Hexagonal hierarchical geospatial indexing system [En ligne].

²⁴ Brodsky Isaac, H3: Uber's Hexagonal Hierarchical Spatial Index [En ligne].

²⁵ Soit « *considérer l'inscription des différents phénomènes étudiés à une échelle géographique pertinente, et à recenser les intersections, les chevauchements qui s'opèrent selon les échelles* » (Lasserre *et al.*, 2016 : 65).

²⁶ Terme forgé par analogie avec celui de territoire, par Camille Parrain, 2012, « La haute mer : un espace aux frontières de la recherche géographique », *Echogéo*, n°19, 11 p.

tomber sur les écueils de la généralisation abusive » (Lasserre *et al.*, 2016 : 21) et « *s'inscrit dans des territoires plus concrets, de taille et de nature politique variées* » (Loyer, 2019 : 13). Quant à la géostratégie, elle comprend la stratégie (problèmes militaires à petite échelle) et la tactique (qui les envisage à grande échelle géographique) (Rosière, 2001 : 40) et se définit comme « *l'analyse de la spatialisation de la stratégie* ». Soit la spatialisation de la combinaison de différentes forces sur plusieurs théâtres d'opérations pour conduire la manœuvre stratégique dans une région (stratégie opérationnelle), des moyens déployés pour atteindre les objectifs de la stratégie totale (stratégie générale) et de la combinaison des moyens divers pour atteindre les objectifs fixés par le pouvoir politique (stratégie totale). Pour cela, elle s'appuie sur la géographie physique (milieux terrestre, aérien et maritime) et humaine²⁷ (Boulanger, 2023 : 5- 6).

3.3 Une démarche analogue à la géographie des risques ?

L'intelligence géospatiale maritime et la géographie ont un même objet : les risques. Dans le domaine de l'intelligence géospatiale maritime, ils sont généralement de nature anthropique²⁸. Par exemple, l'attaque d'un navire constitue un risque, tout comme la coupure d'un câble internet. Les risques et les catastrophes étant par essence des objets complexes (grand nombre de composantes, évolution non-linéaire et dépendante des conditions initiales, combinaison de plusieurs échelles spatiales ou niveaux d'organisation) (Dauphine, Provitolo, 2013 : 10), l'intelligence géospatiale gagnerait donc à intégrer la systémique.

De plus, la géographie des risques et l'intelligence géospatiale maritime ont une approche commune du risque basée sur la temporalité. En effet, si certains insistent sur la collecte d'informations en temps réel : « *le Geoint consiste à collecter et à analyser toute une série de sources, en théorie en temps réel, pour produire une information de qualité qui sera exploitée par le décideur militaire ou politique, mais aussi par les unités dans le théâtre d'opérations* » (Boulanger, 2016a : 104), des analyses historiques des activités maritimes peuvent être menées. C'est le choix effectué dans le projet, cela permet de comprendre l'avènement d'une situation, mais aussi de prévoir des situations similaires.

Ainsi, la « *prédictive* » est à l'intelligence géospatiale maritime (cf. 2.1) ce que la « *prévision* » (Bétard, Fort, 2014 : 304) est à la géographie des risques. En effet, la prévision, « *une représentation précise d'un événement futur qui sera le résultat de causes déjà agissantes* » qui peut s'appuyer sur trois méthodes empirique (qui mobilise généralement l'histoire), déterministe (qui part de lois causales pour évaluer les mécanismes des catastrophes) et probabiliste (elle établit le plus souvent une probabilité d'occurrence d'un aléa traduite en durée) (Dauphiné, Provitolo, 2013 : 300-307) a pour objectif l'anticipation. Tout comme la prédictive, dont la sémantique relève davantage du domaine de la statistique (Leconte, 2012 : 96).

²⁷ Elle s'est élargie à l'espace hertzien ou électromagnétique (espace des communications et signaux), à l'infosphère (recouvrant toutes les formes d'informations, des tracts aux réseaux sociaux) et au cyberspace (espace virtuel dans lequel l'information numérique circule) (Boulanger, 2023 : 72).

²⁸ Les huit domaines du géoint maritime que nous avons identifiés sont les suivants : piraterie, incidents maritimes, migrations illégales, trafic de stupéfiants, terrorisme, pêches illégales, sécurité environnementale et cybersécurité.

Le caractère horodaté des données, propre à l'étude de risques, a une influence sur leur représentation. Cependant, si la cartographie statique permet de représenter des durées, des vitesses et des fréquences grâce aux variables sémiologiques²⁹, « *le caractère chronologique et évolutif des événements est peu perçu à travers l'application de [celle-ci].* ». De plus, procéder à l'ajout d'une collection de cartes n'est pas non plus suffisant : « *un événement (...) sur un pas de temps long, nécessite un grand nombre de cartes pour [rendre compte de] l'évolution temporelle* ». La carte dynamique en utilisant un environnement animé peut résoudre cette difficulté : l'utilisateur peut « *interagir avec la carte et contrôler l'animation (...)* » (Arnaud, Davoine, 2009 : 61). Cependant, dans l'objectif de vulgariser les travaux réalisés, nous proposons l'ajout à des cartes statiques de schèmes géo-temporels : tableaux de bord³⁰, frises chronologiques, graphiques. Ces derniers permettent de tenir compte de la temporalité de l'information ; l'intelligence géospatiale enrichit le système iconographique de la géographie par la création de « cartes complexes » ou « cartes multidimensionnelles ».

Conclusion

L'application de l'intelligence géospatiale maritime à l'analyse des câbles internet sous-marins, pour le bassin Pacifique, a mis en évidence une méthode d'analyse qui associe l'algorithmique et les sciences humaines et sociales aux diverses étapes du processus. En effet, la caractérisation des phénomènes maritimes, qui se base sur une démarche hypothético-déductive et associant parfois l'abduction (sur un volume restreint de données), est un préalable à la mobilisation des outils relatifs aux sciences des données.

De plus, du point de vue épistémologique et conceptuel, l'intelligence géospatiale a une filiation évidente avec la géographie militaire anglo-saxonne, mais l'accélération de son développement est liée aux NTIC³¹ et à l'importance donnée au renseignement. Ainsi, l'intelligence géospatiale maritime exploite notamment le système AIS, qui génère des données massives. Par conséquent, en raison de leur volume, mais aussi de leurs lacunes informationnelles (erreurs, falsifications...), elles doivent non seulement être traitées par les chercheurs en sciences des données, mais également couplées à des données contextuelles ; cela nécessite des compétences qualitatives et une approche holistique, propre à la géographie.

Pour ces raisons, l'étude des liens entretenus entre l'intelligence géospatiale et la géographie a été développée, afin d'affiner la réflexion sur la méthode, les objets et les outils qui la caractérisent. Concernant la méthode, elle emprunte largement aux sciences humaines et sociales : démarche qualitative (état de l'art, expériences de terrain et entretiens). Du point de vue des outils, elle s'appuie sur les graphes, les algorithmes et l'indexation hexagonale. Cette dernière lui permet de rendre visible les territoires maritimes à différentes échelles ; cela offre la possibilité de mener des analyses qui relèvent de la géopolitique ou de la géostratégie. Enfin, elle s'intéresse principalement aux risques (objet de connaissance). Nous avons ainsi mis en évidence que la dimension temporelle de cet objet engendre des représentations spécifiques,

²⁹ Taille, couleur, transparence, grain, texte...

³⁰ Un tableau de bord est un ensemble d'éléments visuels (cartes, textes, listes, diagrammes, indicateurs...) affichés sur un même écran ou page. Il offre une vue synthétique, didactique, mais aussi multidimensionnelle d'un ou plusieurs phénomènes.

³¹ Nouvelles technologies de l'information et de la communication

une « carte complexe ». L'ensemble de ses éléments constitue le socle de l'intelligence géospatiale maritime (même si les hypothèses, les données et algorithmes doivent varier), qui peut s'appliquer à tous les cas d'études : de la pêche illégale à la piraterie en passant par les incidents maritimes.

Au regard de ses analogies avec la géographie des risques, nous avançons qu'une réflexion sur l'intelligence géospatiale maritime gagnerait à intégrer l'approche systémique. En effet, l'espace maritime peut se penser comme un système complexe, tout comme les phénomènes qui s'y déploient. De plus, les outils de la systémique : systèmes, structures, boucles de rétroactions, approches téléologique (Brunet, 1979 : 405-406) et transcalaire (Djament-Tran, 2015 : 68) renforceraient sa dimension prédictive. Cette dernière doit être davantage renseignée, car si l'essence stratégique des savoirs sur l'espace géographique a été réaffirmée, la prédictive joue un rôle fondamental pour la pacification du monde : la géographie doit aussi servir à faire la paix³².

Bibliographie

- Arnaud Aurélie**, Davoine Paule-Annick, 2009, « Cartographie des temporalités dans le domaine des risques », *Le Monde des Cartes*, Comité français de Cartographie, n° 202, pp. 59-70
- Audard Frédéric**, Carpentier Samuel, Oliveau Sébastien, 2014, « Les “big data” sont-elles l'avenir de la géographie [théorique et quantitative] ? », 20^{ème} Biennale de géographie d'Avignon, Géopoint-2014, Controverses et géographies, Juin 2014, Avignon, France. pp. 1-4
- Bacastow Todd S.**, Bellafiore Dennis, 2009, “Redefining Geospatial Intelligence”, *American Intelligence Journal*, pp. 38-40
- Bacastow Todd S.**, 2023, “Definition of GEOINT (Géospatial Intelligence)”, *The International Encyclopédia of Geography*, 6 p.
- Bailly Antoine**, Beguin Hubert, Scariati Renato, 2016, *Introduction à la géographie humaine*, Collection U, Armand Colin, Paris, 240 p.
- Banos Arnaud**, 2005, « Favoriser l'étonnement : la voie de l'abduction dans les Systèmes d'Information Géographiques », dans Fosting Jean-Marie (Dir.), *Apport des SIG à la recherche*, Presses universitaires d'Orléans, pp. 237-254
- Bavoux Jean-Jacques**, 2009, *La géographie, Objet, Méthodes, Débats*, Coll. U, Armand Colin, Paris, 312 p.
- Beguin Hubert**, 1985, « La théorie dans la démarche géographique », *L'Espace géographique*, vol. 14, n° 1, pp. 65-68
- Bétard François**, Fort Monique, 2018 : « Les risques liés à la nature et leur gestion dans les Suds », *Bulletin de l'association de géographes français*, vol. 91, n° 3, pp. 303-312
- Boulanger Philippe**, 2006, *Géographie militaire*, Carrefours, Ellipses, 384 p.
- Boulanger Philippe**, 2016a, « Geospatial Intelligence et géopolitique : aspects d'une révolution en cours », *Revue Défense Nationale*, n° 795, pp. 103-108.
- Boulanger Philippe**, 2016b, « De la géographie militaire au Géospatial Intelligence en France (XIX^e-XX^e siècle) », dans Boulanger Philippe (Dir.), *Géographie et guerre. De la géographie militaire au Geospatial Intelligence en France (XVIII^e-XXI^e siècle)*, Bulletin de la Société de géographie, pp. 153- 167

³² Expression empruntée au titre de l'ouvrage de Philippe Pelletier, *Quand la géographie sert à faire la paix* (2017).

- Boulanger** Philippe, 2019, « Le Geoint à l'origine d'une nouvelle science de l'information géospatiale ? », *Défense*, n° 200, pp. 32-36
- Boulanger** Philippe, 2020, *La géographie reine des batailles*, Perrin, Paris, 364 p.
- Boulanger** Philippe, 2021, « Géopolitique du Geospatial Intelligence dans le monde », *Stratégie* 2021, vol. 2, n° 126-127, pp. 35-49
- Boulanger** Philippe, 2023, *Introduction à la géostratégie*, Repères, La Découverte, Paris, 128 p.
- Brunet** Roger, 1979, « Systèmes et approche systémique en géographie », *Bulletin de l'Association de géographes français*, n° 465, pp. 399-407
- Brunet** Roger, Ferras Robert, They Hervé, 1993, *Les mots de la géographie*, Reclus, La Documentation Française, Paris, 518 p.
- Caillard** Vincent, 2016, « La géovisualisation, outil d'analyse GEOINT », dans Boulanger Philippe (Dir.), *Géographie et guerre. De la géographie militaire au Geospatial Intelligence en France (XVIII^e-XXI^e siècle)*, Bulletin de la Société de géographie, pp. 177-187
- Cuyala** Sylvain, Commenges Hadrien, 2014, « La diffusion de la géographie "théorique et quantitative" en France : quel modèle de diffusion spatiale ? », *L'Espace géographique*, vol. 4, Tome 43, pp. 289- 307
- Dauphiné** André, Provitolo Damienne, 2016, *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Collection U, Armand Colin, Paris, 416 p.
- Debarbieux** Bernard, « Territoire-territorialité-Territorialisation : aujourd'hui encore et bien moins que demain » dans Vanier Martin (Dir.), 2009, *Territoires, territorialité, territorialisation Controverses et perspectives*, Espace et Territoires, Presses universitaires de Rennes, Rennes, 232 p.
- Duverger** Anne-Clémence, Ray Cyril, 2024, « Méthode de gestion et d'analyse de l'information spatiale et temporelle maritime », Atelier Gestion et l'Analyse de données Spatiales et Temporelles (GAST), 24^{ème} Journées Francophones Extraction et Gestion des Connaissances (EGC), Dijon, Janvier 2024, 17 p.
- Djament-Tran** Géraldine, 2015, « La résilience, une question d'échelles », dans *Reghezza Magalie, Rufat Samuel* (Dir.), 2015, *Résilience : territoires et sociétés face aux risques, à l'incertitude et aux catastrophes*, Londres, ISTE, pp. 61-80
- Drish** Jérémy, 2015, « Territorialisation des mers et des océans : entre mythes et réalités », vol. 3, n° 30, pp. 129-139
- Feuillet** Thierry, Cossart Étienne, Commenges Hadrien, 2019, *Manuel de géographie quantitative. Concepts, outils, méthodes*, Cursus, Armand Colin, 240 p.
- Guerin** Arnaud, 2021, « Relancer la géographie française avec l'intelligence artificielle », *Revue Défense Nationale*, n° 842, pp. 78-82
- Iphar** Clément, Napoli Aldo, Ray Cyril, 2016, « Démarche d'analyse de l'intégrité d'un système de localisation de navires », *SAGEO*, 4 p.
- Kovarick** Vladimir, 2012, « Understanding the role of geographic data and processes in geospatial intelligence », 4^{ème} Conférence scientifique et technique internationale, Bratislava, 7 p.
- Lacoste** Yves, 1976, *La géographie, ça sert, d'abord, à faire la guerre*, La Découverte, Paris, 249 p.
- Lasserre** Frédéric, Gonon Emmanuel, Mottet Eric, 2016, *Manuel de géopolitique ; enjeux de pouvoir sur des territoires*, Collection U, Armand Colin, Paris, 384 p.
- Leconte** Gauvin, 2013, « Le problème des prédictions dans les sciences expérimentales », *Philonsorbonne*, n° 7, pp. 81-99
- Loyer** Barbara, 2019, *Géopolitique. Méthodes et concepts*, Cursus, Armand Colin, 224 p.
- Lucazeau** Thibaut, 2018, *La géographie opérationnelle en gendarmerie : « cette philosophie de la géographie que la gendarmerie ignore »*, Thèse de doctorat en géographie, spécialité géopolitique, Dir. Boulanger Philippe, Institut Français de géopolitique, Université de Paris VIII, 651 p.

Maslek Elayam, Maryam, Ray Cyril, Claramunt Christophe, 2021, « Modèle de graphe pour l'analyse des structures de trajectoires maritimes », In 21^{ème} édition de la conférence Extraction et Gestion des Connaissances (EGC), pp. 1-6

Maslek Elayam Maryam, Kerhoas Glady, Lambert du Cruet Vincent, Ray Cyril, Ménard Arnaud, 2022, "On the interest of hexagonal abstraction of maritime information", OCEANS 2022, Hampton Roads, Hampton Roads, VA, USA, 5 p.

Majerowicz Jérémie, 2016, « Les SIG, une plateforme centrale pour le GEOINT », dans Boulanger Philippe (Dir.), *Géographie et guerre. De la géographie militaire au Geospatial Intelligence en France (XVIII^e-XXI^e siècle)*, Bulletin de la Société de géographie, pp. 199-207

Miossec Alain, 2014, *Géographie des mers et des océans*, Didact Géographie, Presses universitaires de Rennes, Rennes, 502 p.

Miossec Alain, 2021, « Assumer la globalité de la géographie », dans Pitte Jean-Robert, Michon Perrine (Dir.), *À quoi sert la géographie ?*, Académie des sciences morales et politiques, Société de géographie, Paris, pp. 77-91

Morel Eric, Boulanger Philippe, 2016, « La géolocalisation et le GEOINT comme outil d'analyse sociétales et géopolitique », dans Boulanger Philippe (Dir.), *Géographie et guerre. De la géographie militaire au Geospatial Intelligence en France (XVIII^e-XXI^e siècle)*, Bulletin de la Société de géographie, pp. 189-197

Morisseau Jean-Philippe, 2018, « Les défis du GEOINT français », *Défense et Sécurité Internationale*, n° 133, pp. 92-97

Mourton Jonathan Jay, 2022, *Gouvernance sécuritaire et technologie spatiale. Le Japon face aux mouvements insurrectionnels et terroristes en Asie du Sud-Est*, Thèse de doctorat en Géographie politique, culturelle et historique, Dir. Sevin Olivier, Sorbonne université, 518 p.

Ray Cyril, Iphar Clément, Napoli Aldo, Gallen Romain, Bouju Alain, 2015, "DeAIS project: Detection of AIS spoofing and Resulting Risks", OCEANS'15 MTS/IEEE, Gênes, Italie, Mai 2015, pp. 1-6

Regnier Paul-David, 2008, *Dictionnaire de géographie militaire*, CNRS éditions, Paris, 348 p.

Mucchielli Alex (Dir.), 2009 (3^{ème} édition), *Dictionnaire des méthodes qualitatives en sciences humaines*, Paris, Armand Colin, Paris, 280 p.

Pelletier Philippe, 2017, *Quand la géographie sert à faire la paix*, Le Bord de l'eau, Bordeaux, 244 p.

Pumain Denise, 2017, « La géographie et les données massives », dans Bouzeghoub Mokrane et Mosseri Rémy (Dir.), *Les Big Data à découvert*, CNRS éditions, Paris, pp. 30-31.

Rosière Stéphane, 2001, « Géographie politique, géopolitique et géostratégie : distinctions opératoires », *L'Information Géographique*, vol. 65, n° 1 pp. 33-42

Tsatcha Dieudonné, Saux Eric, Claramunt Christophe, 2014, "A bidirectional path-finding algorithm and data structure for maritime routing", *Journal of Geographical Information Science*, pp. 1355-1377

Van Puyvelde Damien, 2017, « Le renseignement géospatial américain dans les frappes contre Daech : une arme à double tranchant », *Stratégique*, vol. 3, n° 116, pp 223-232

Wæssner Raymond, 2010, « La territorialisation : proposition pour la compréhension du phénomène par une entrée systémique », *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, vol. 4, pp. 669-685

Rapports institutionnels

International Maritime Organization (IMO), 2020, SOLAS Consolidated Edition, 478 p.

International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), 2014,

Recommendation ITU-R M.1371-5 - Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band, 148 p.

Ministère des Armées, Rapport du groupe de travail « Espace », 2019, Stratégie spatiale de défense, 70 p.

Ministère de l'Intérieur, 2020, Livre blanc de la sécurité intérieure, 332 p.

National Geospatial Intelligence Agency, Office of Geospatial-Intelligence Management, 2006, Nation

System for Geospatial Intelligence, Geospatial Intelligence (GEOINT) Basic Doctrine, 52 p.
National Geospatial Intelligence Agency, National System for Geospatial Intelligence, 2018,
Geospatial Intelligence (GEOINT) Basic Doctrine, 48 p.

Sitographie

Brodsky Isaac, H3: Uber's Hexagonal Hierarchical Spatial Index [En ligne]. Uber Technologies Inc, modifié en février 2024 [juillet 2023].

<https://www.uber.com/en-FR/blog/h3/>

Uber Technologies, H3-Hexagonal hierarchical geospatial indexing system [En ligne]. Docusaurus, modifié en février 2024 [mars 2020].

<https://h3geo.org/>

Institut national de l'information géographique et forestière, Géodésie [en ligne]. Institut national de l'information de l'information et forestière, Ministère de la transition écologique et solidaire, ministère de l'Agriculture et de l'alimentation, modifié le 27 juin 2023 [octobre 2022].

<https://geodesie.ign.fr/>

Morisseau Jean-Philippe, quelques questions sur le GEOINT [en ligne]. WordPress.com, modifié en août 2018 [août 2018].

<https://geointblog.wordpress.com/2017/01/09/la-decennie-decisive-du-geoint-1ere-partie>

Snow Dwaine, Adding a 4th V to BIG Data - Veracity [en ligne]. Blogger, modifié en décembre 2023 [octobre 2015].

<http://dsnowondb2.blogspot.com/2012/07/adding-4th-v-to-big-data-veracity.html>

Tabarly, Sylviane, 2005, Isotropie et anisotropie [en ligne]. Géoconfluence, modifié en mars 2023 [octobre 2016].

<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/isotropie-anisotropie-1>.

Réflexion autour de la géographie théorique et quantitative

Didier JOSSELIN & Guilhem BOULAY

Contexte

Le laboratoire ESPACE a mis à l'ordre du jour d'une de ses Assemblées Générales de 2023 la question de l'avenir de la géographie quantitative. Un atelier collaboratif a été réalisé afin de préparer le texte de l'appel de Géopoint 2024 et de susciter des contributions à cette conférence, mais également pour confirmer ou infirmer le fait que la géographie quantitative reste au cœur des préoccupations et des activités d'ESPACE et renforcer la structure et le positionnement scientifiques de l'unité. Il s'agissait d'ateliers animés par des binômes souvent composés d'un jeune chercheur et d'un chercheur confirmé. Quatre groupes d'environ dix membres du laboratoire étaient répartis dans plusieurs salles et les animateurs passaient successivement entre ces groupes. Chaque binôme d'animateurs avait en charge de poser les mêmes questions aux quatre groupes, puis à la fin, d'en faire une synthèse. Les questions étaient :

- *À partir de quel moment fait-on de la « géographie théorique et quantitative » (où mettre le curseur) ?*
- *Quel(s) lien(s) et apport(s) croisé(s) la géographie théorique et quantitative entretient-elle avec l'analyse spatiale et la géomatique ?*
- *Quelle est la place de la géographie théorique et quantitative au sein de la géographie et aux côtés des autres disciplines ?*
- *Quelle(s) évolution(s) la géographie théorique et quantitative a-t-elle connu, va-t-elle ou devrait-elle connaître ?*

Nous n'analyserons pas en détails les apports des discussions autour des quatre questions posées. En revanche, nous pouvons dégager plusieurs points saillants révélés lors de ces ateliers :

1. Les définitions et les périmètres de la géographie théorique et quantitative, de l'analyse spatiale et de la géomatique ne sont pas clairement établis, ni totalement partagés ; ils sont imbriqués et ne constituent pas une parfaite partition ;
2. Pourtant, l'unité et le sentiment d'appartenance à ESPACE ne semblent aucunement remis en cause, autour d'un objet flou, qui serait effectivement une certaine pratique de la « mesure de l'espace », qui peut se démarquer d'autres courants de la géographie (sociale, critique...);
3. Pour les jeunes chercheurs, le sentiment d'appartenance à un domaine spécifique que serait la géographie théorique et quantitative est faible, voire nul ; géomatique et analyse spatiale apparaissent plus fédérateurs pour cette génération ; ce n'est pas le cas pour les chercheurs seniors, qui revendiquent une certaine filiation ;
4. L'ensemble des participants aux ateliers approuve le fait que la géographie développée à ESPACE est essentielle et a toute sa place dans la géographie en général, par son apport spécifique et substantiel à l'aide à la décision territorialisée ;
5. La dialectique entre méthodologies et thématiques spatiales est riche et équilibrée : à ESPACE, globalement, aucun des deux ne l'emporte sur l'autre, en dépit d'une forte teinte méthodologique de l'unité (en tous les cas, en termes d'image renvoyée au paysage académique) ;
6. Dans un contexte d'interdisciplinarité, auquel participe largement l'unité, l'avenir de la géographie théorique et quantitative en tant que domaine ou champ scientifique relativement bien délimité reste une question en suspens.

Face à ces constats, nous pouvons forger quelques hypothèses, entrevoir des explications, proposer des pistes.

Définitions

Dans ce texte, nous utiliserons plusieurs vocables dont nous donnons une définition de notre point de vue. Commençons par *analyse spatiale*. Même si elle peut couvrir des acceptions différentes, elle est relativement aisée à définir : il s'agit de la mise en œuvre du processus intellectuel de description et de compréhension d'un système, de ses composants et de ses relations, dans l'espace géographique. L'espace peut être l'objet, comme le support, de l'analyse. Dans notre proposition, *géographie*, *théorique* et *quantitative* sont des termes associés. Intéressons-nous aux deux adjectifs. *Théorique* relève des concepts et de l'abstraction, qui s'organisent autour d'hypothèses, de règles, de lois d'un domaine particulier. *Quantitative* renvoie à une façon de mesurer l'espace géographique, basée sur une quantité suffisante de mesures et de données pour appliquer des méthodes statistiques ou de détection de régularités, permettant d'extraire des règles ou des lois. C'est l'intersection de ces trois vocables qui détermine le champ scientifique de la géographie théorique et quantitative. On relèvera un paradoxe : si la théorie peut rester abstraite, la mesure est concrète et appliquée, à l'espace géographique, comme aux territoires. C'est l'association de ces termes qui fait la singularité et la force de ce champ. On s'aperçoit, notamment lors des discussions des commissions de recrutement de jeunes enseignants-chercheurs en géomatique, de la polysémie de ce terme. Pour beaucoup, la géomatique est l'usage de l'informatique en géographie ou, plus généralement, pour toute étude requérant des méthodes numériques d'analyse spatiale. Il s'agit d'une vision plutôt utilitaire et technique. Pour les personnes plus averties, la géomatique est un champ de recherche à part entière, riche, cohérent et interdisciplinaire, traitant de problématiques, d'approches et de méthodes en lien avec l'information géographique au sens large. On parle alors de *science(s) de l'information géographique*, domaine de prédilection du Groupement de Recherche MAGIS du CNRS. On retrouve cette vision alternative dans ce qu'on a appelé pendant un temps les *Systèmes d'Information à Référence Spatiale* qui associaient géomatique et territoire, avec une dimension organisationnelle autour des acteurs, au-delà d'une approche strictement spatiale. Aujourd'hui, force est de constater que cette approche s'est amenuisée, au profit d'une perception et d'une pratique plus techniques des SIG avec la règle des A de Salgé de 1996 (Acquérir, Archiver, Accéder, Analyser, Abstraire), de par leur démocratisation dans les domaines académiques, privés ou des collectivités.

Le paradoxe de l'évidence

Parmi les membres du laboratoire, une immense majorité pratique la mesure de l'espace, de façon descendante (application de théorie ou de méthode sur des cas concrets) ou ascendante (construction d'une théorie à parties de mesures). On ne se pose plus la question s'il faut le faire ou non, c'est naturellement inscrit dans les recherches menées à ESPACE. Cette évidence, si elle renforce l'existence et la consistance mêmes de la géographie théorique et quantitative, génère également un effet de dilution et d'une certaine façon, de perte d'identité, puisque les frontières du domaine sont rendues floues, intrinsèquement par la variété des méthodes employées et extrinsèquement par la multitude des problématiques et des thèmes d'application. On observe exactement ce même paradoxe pour la géomatique et pour l'analyse spatiale, renforcées par l'accès de plus en plus aisé (transparent du point de vue technique, c'est à dire opaque du point de vue méthodologique) aux multiples fonctionnalités offertes par les Systèmes d'Information Géographique.

Les vagues déferlantes des thématiques rythmées par les sirènes de la demande sociale

Actuellement, la recherche (comme l'enseignement supérieur d'ailleurs, via l'employabilité de jeunes diplômé.e.s) est largement influencée, voire guidée, par la demande sociale, en particulier en géographie. Il s'agit d'une tendance lourde, qui se concrétise notamment par l'augmentation continue du Crédit Impôt Recherche à destination des entreprises, les politiques affirmées de financement de

doctorat favorisant explicitement le co-financement privé (bourses régionales, CIFRE), la multiplication des appels à projets relevant de la recherche-action, tels que les AMI (Appels à Manifestation d'Intérêt), voire même les PEPR (par exemple, pour le PEPR Ville Durable et Bâtiments Innovants, les recherches doivent être « tirées par l'aval »). Cet état de fait induit deux grandes évolutions. D'une part, une éviction progressive de la dimension théorique et fondamentale de la recherche dans le contenu des projets financés ; d'autre part, une préférence quasiment systématique accordée aux problématiques thématiques plutôt que méthodologiques, la mesure et tout son cortège de méthodes étant reléguée au statut d'outil au service. Cette évolution renforce le paradoxe de l'évidence présenté précédemment.

Un sentiment d'appartenance à la géographie théorique et quantitative en question

Il découle de ce mouvement de la recherche en géographie théorique et quantitative une baisse du sentiment d'appartenance des jeunes chercheurs.se.s à cette communauté au sein de laquelle, à travers la mesure, on disposerait pourtant de suffisamment de matière à discuter et de substance scientifique à partager. Le phénomène de dispersion évoqué dans la pratique de la recherche en géographie se traduit également, en toute logique, dans les réseaux de chercheurs, qui s'organisent davantage autour de programmes fédérateurs sur le moyen terme et d'objectifs thématiques que de questions méthodologiques. Il faut alors se tourner vers d'autres disciplines (mathématique, informatique, par exemple) pour pouvoir construire et développer des projets répondant à des questionnements théoriques en géographie. Cette évolution, si elle apporte beaucoup à la démarche scientifique, ne fait qu'ajouter un argument de plus à la perte d'identité de la géographie théorique et quantitative.

La nécessaire primauté de l'objectivité dans les processus de construction des connaissances

Dans une Société où les apports de la science sont remis en question par la population ou dévoyés par les groupes de pression, où l'usage des réseaux sociaux peut transformer rapidement une rumeur en vérité absolue, le besoin de disposer de mesures décrivant les objets et d'analyses des processus géographiques est criant. De notre point de vue, le chercheur *quantitativiste*, comme tout acteur dans les territoires, ne prétend pas produire une connaissance absolue dénuée de toute objectivité, dans la mesure où il adopte un angle de vue qui lui est propre. Il cherche toutefois à éviter une position trop normative, ni dogmatique de ses conclusions, qui ne seraient étayées que sur quelques profils types à la suite d'entretiens, certes approfondis, mais non représentatifs. C'est précisément par sa posture d'éloignement maximal au sujet qu'il traite et parce qu'il s'appuie sur des mesures et des observations en quantité suffisante, qu'il peut garder la distance et le discernement nécessaires à toute analyse scientifique. De surcroît, il existe des méthodes d'analyse de sensibilité qui permettent de relativiser l'usage des méthodes et des données dans un contexte concret de planification et estimer ainsi la marge de manœuvre dont dispose le chercheur dans le processus d'aide à la décision objectivée. Enfin, n'observer que les réseaux d'acteurs et leurs interactions sous l'angle des représentations, sans étude quantitative préalable approfondie, sous prétexte que la décision revient toujours *in fine* aux acteurs du territoire, est une approche insuffisante et sujette à caution, voire même risquée pour la Société et son futur.

L'optimalité ne détient aucunement la vérité absolue

Au-delà de la question de la description objective des espaces géographiques par la mesure, un certain nombre de recherches visent à trouver les approches pertinentes pour construire des villes et des territoires intelligents, frugaux, efficaces, équitables... Cette série d'adjectifs montrent combien les objectifs à atteindre peuvent être variés et parfois contradictoires. Par exemple, au sein du triangle de la durabilité (économique, sociale, environnementale), le chercheur peut placer le curseur en fonction

du territoire qu'il cherche à décrire ou promouvoir. Rien que le fait de se placer dans un triangle de texture, montre que ce que l'on va gagner d'un côté, on va le perdre de l'autre. Cette approche implique la prise en compte d'un ensemble de critères, leur pondération relative et leur combinaison (additive, multiplicative...). Derrière ces choix méthodologiques se profile un point de vue subjectif qui, si l'on reprend l'exemple de la durabilité, peut opposer des groupes d'entreprises, des militants écologistes ou des acteurs œuvrant dans le social. En définitive, toute optimalité spatiale, voire territoriale, explicitée de manière transparente, ne porte aucun caractère normatif, à partir du moment où les hypothèses sont claires. Il faut donc bien se garder d'avoir peur des approches de la géographie quantitative, telles que l'optimisation spatiale ou la géoprospective, qui constituent des outils puissants pour l'exploration des possibles et ne peuvent aucunement prétendre à détenir la vérité absolue.

Éviter la monographie

Le lecteur ne sera pas étonné de relever que, pour un géographe quantitativiste, la monographie n'est point une finalité. Quand on parle de monographie, on pense en premier lieu à la description de lieux ou de portions de territoires qui, si elle apporte une connaissance socio-spatiale approfondie, extrêmement détaillée, riche et instructive (que ne permet pas toujours une analyse quantitative), ne possède pas particulièrement de capacité de généralisation ou d'aide à la décision. En réalité, cette difficulté se rencontre dans beaucoup de sciences. Par exemple, en informatique, certains auteurs publient des articles dans des revues indexées de haut niveau académique dont le seul apport est d'améliorer de X % (X étant en général assez faible) la rapidité ou l'exactitude d'un algorithme, sur un jeu de données partagé, théorique et stylisé (c'est à dire revêtant des caractéristiques intéressantes par rapport à l'algorithme qui doit résoudre le problème, mais ne représentant que très faiblement le réel). Cela reste une forme de monographie, qui pourtant s'en défend, se drapant d'une forte scientificité. En effet, le sujet et la contribution de l'article sont souvent extrêmement ciblés. La capacité de généralisation de ce type de recherche est largement discutable. La géographie théorique et quantitative, ainsi que la géomatique, en permanente résonance avec les territoires, doivent pouvoir s'affranchir de ces deux types de monographies, issues des sciences de l'homme et de la société ou des sciences exactes et expérimentales.

(Ré?)concilier le quantitatif et le qualitatif

Dans ce paragraphe, nous discutons de la dualité entre le quantitatif et le qualitatif, à différents niveaux. Le premier niveau a déjà été évoqué et concerne les données manipulées en géographie. Peu de recherches sont développées à l'interface entre les méthodes qualitatives et quantitatives, encore moins en associant fortement les deux. Généralement, les chercheurs préfèrent l'une ou l'autre. Pourtant, on pourrait davantage favoriser (par exemple dans les thèses) le couplage entre des traitements statistiques sur de gros échantillons et des entretiens ciblés creusant certains aspects. En effet, les deux sont très complémentaires : on peut repérer la tendance par une approche quantitative et révéler la singularité (et parfois de l'innovation) par des entretiens approfondis. D'un point de vue quantitativiste, il existe des voies intéressantes de mélange de ces deux approches, relevant de l'analyse exploratoire, qui stipule que les individus ne sont pas interchangeables, que l'on doit conserver les « outliers » en utilisant des méthodes robustes qui ne les éliminent pas des corpus, et que l'observation des individus doit se faire graphiquement et visuellement, en associant un ensemble de représentations des relations statistiques et sémantiques entre les objets géographiques étudiés. Une telle approche amène autant à considérer la tendance, les groupes que la singularité des individus. De même, si la géographie théorique et quantitative favorise largement la modélisation et les approches déductives, voire confirmatoires, de l'analyse spatiale, elle n'omet pas les approches plus

inductives et exploratoires, voire la flânerie et la sérendipité qui sont autant d'approches pour observer le réel sous un autre angle et acquérir des connaissances nouvelles.

La voie de la transdisciplinarité

Nos observations précédentes ont présenté notre constat : la dilution de la géographie théorique et quantitative, le faible sentiment d'appartenance des jeunes générations de chercheurs à ce champ, la suprématie des problématiques thématiques, l'apport, la souplesse et l'ouverture, parfois méconnues ou dévoyées, des méthodes quantitatives. Ces caractéristiques donnent finalement un avantage substantiel aux approches centrées sur la méthode : la capacité de transdisciplinarité. Celle-ci va au-delà de la multidisciplinarité (juxtaposition de disciplines) et de l'interdisciplinarité (interactions entre disciplines). En effet, le questionnement par la méthode (et la mesure, au sens large) est l'angle pertinent pour transcender les disciplines. On peut ainsi transformer les apparentes faiblesses de ces approches en un formidable levier, liant les champs thématiques et les problématiques territoriales. C'est la position résolument défendue par la géomatique française qui, par exemple, propose en 2025 une école de printemps méthodologique du GdR MAGIS, où les thématiques seront là pour éclairer les méthodes (et non l'inverse). Un autre exemple est la revue JIMIS (Journal of Interdisciplinary Methodologies and Issues in Science) d'Episcience, qui mélange les disciplines et leurs points de vue sur des sujets transversaux. Ce positionnement peut recentrer l'attention des (jeunes) chercheurs sur le champ de la géographie théorique et quantitative (mais aussi de la géomatique et de l'analyse spatiale), tout en l'ancrant solidement dans les thématiques actuelles, essentielles à la construction d'une Société durable, en toute connaissance de cause.

Géographie spontanée ou spatialité ? Une question épistémologique

Proposition de Sylvie Joublot Ferré (UQAM) & Pierre-Amiel Giraud (Université de Bordeaux)

Denis Retaillé évoque dans ses travaux, sans jamais vraiment formaliser ni stabiliser la notion, une activité géographique *spontanée*. Il la distingue des activités géographiques *raisonnées* (ou savantes). Il témoigne ainsi du fait que les pratiques individuelles, nourries d'expériences quotidiennes ou plus exceptionnelles (« voir Naples et mourir ») peuvent constituer des leçons de géographie tout aussi valables que celles dispensées dans un cadre scolaire ou académique (Retaillé, 1997, p.13, 37, 55).

Cela revient à dire qu'une certaine activité géographique transformerait spontanément les expériences individuelles et les pratiques en ressource : l'expérience, en un autre sens, émerge alors par accumulation (Retaillé 2010). Cette intuition s'accorde au tournant actoriel dans les sciences sociales, en reconnaissant aux actions individuelles une dimension cognitive (Livet, 2012, p. 270). Par ailleurs, une telle notion ne peut se comprendre que dans le cadre d'une conception relationnelle de l'espace.

La notion de géographie spontanée a également été discutée par Michel Sivignon. L'auteur distingue la géographie spontanée des savoirs vernaculaires et des savoirs scientifiques (Sivignon, 2005). Béatrice Collignon la juge pas tout à fait satisfaisante :

« Celle-ci correspondrait à ce que Michel de Certeau a appelé les "savoirs ordinaires" (1980), et que l'on nomme parfois aussi "savoirs quotidiens", expressions trop floues pour pouvoir être retenues. Mais celle de "géographie spontanée" n'est pas tout à fait satisfaisante non plus, car elle laisse entendre qu'il n'y aurait pas d'apprentissage, et pas de transmission » Collignon, 2005, p. 329.

Cette notion de *géographie spontanée* est restée néanmoins bien ancrée dans le paysage de la géographie, notamment en géographie scolaire et en didactique de la géographie (Frézal-Leininger et Naudet, 2024). Surtout, si chez Denis Retaillé les activités géographiques spontanées et raisonnées n'ont de sens que dialectiquement et dynamiquement (la géographie spontanée résulte de l'intériorisation de segments de savoir, qui peuvent tout à fait provenir de la géographie raisonnée), il n'en va pas de même chez la plupart des auteurs. La géographie spontanée devient celle de l'enfance et de la naïveté (Sivignon, 2020, p. 14) : l'enjeu pour l'école est alors de l'articuler à la géographie raisonnée (Frézal-Leininger et Naudet, 2024). Pour ces auteurs, le raisonné chasserait le spontané, que ce soit par substitution ou par formalisation, par arraisonement. L'implicite anthropologique d'un individu qui, par les apprentissages, deviendrait tendanciellement rationnel n'est pas loin. Il y a là, à notre avis, un appauvrissement considérable de la notion.

La notion de géographie spontanée présente ainsi plusieurs écueils : le terme *spontanée* est peu heureux ; commencer par devoir la distinguer de la géographie raisonnée limite la capacité à penser les deux comme des dimensions consubstantielles à toute activité géographique.

Au fond, il nous semble que si l'on veut prendre au sérieux la position dont témoignait, au moment de

sa formulation, la notion de géographie spontanée, il nous faut probablement en abandonner au moins le terme. En effet, la *spatialité*, « concept clé du tournant spatial » (Volvey, Stock et Calbérac, 2021, p. 35), permet de lever de nombreuses ambiguïtés et de faire amorcer franchement le tournant spatial aux travaux géographiques visant la sphère scolaire.

Références :

Collignon, B. (2005). Que sait-on des savoirs géographiques vernaculaires ? *Bulletin de l'Association de géographes français*, 82e année, 2005-3 (septembre), 321-331.

Caroline Leininger-Frézal, C. et Naudet, C. (2024). Pistes pour une géographie expérientielle dans l'enseignement, *Géococonfluences*, mars 2024.

<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-thematiques/geographie-espaces-scolaires/geographie-a-l-ecole/pistes-geo-experientielle>

Livet, P. (2012). Action et cognition en sciences sociales. In J.-M. Berthelot, (Éd.), *Épistémologie des sciences sociales* (1re édition "Quadrigé"), (pp. 269-316). Paris: Presses universitaires de France.

Retailé, D. (1997). *Le monde du géographe*. Paris: Presses de Sciences Po.

Retailé, D. (2010). « Au terrain, un apprentissage ». *L'Information géographique* 74 (1): 84--96.

<https://doi.org/10.3917/lig.741.0084>.

Sivignon, M. (2005). La géographie spontanée, ou la rose des vents de Diamandis Galanos (Spontaneous geography, or Diamandis Galanos' compass card). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 82e année, 2005-3 (septembre).

Sivignon, M. (2020). Chapitre 1. La géographie spontanée, le paysage et la carte. In *Géographie humaine: Vol. 4e édition* (p. 13-40). Armand Colin. <https://doi.org/10.3917/arco.charv.2020.01.0013>

Volvey, A., Stock, M. et Calbérac, Y. (2021). *Spatial Turn*, tournant spatial, tournant géographique. In Clément, V., Stock, M. et Volvey, A. *Mouvements de géographie. Une science sociale aux tournants*, pp. 21-38. Rennes : Presses Universitaires de Rennes.

Quel(s) futur(s) pour la géomatique à l'heure de la science des données ? Quid d'une science des données géographiques ?

Boris Mericskay, UMR ESO, Université Rennes 2
Boris.mericskay@univ-rennes2.fr

En écho à des données spatiales toujours plus nombreuses et complexes, les attentes et les pratiques des professionnels qui utilisent des informations géographiques évoluent. D'un côté, les méthodes et les outils d'analyse spatiale comme de cartographie ne sont plus forcément adaptés aux caractéristiques des données géographiques actuelles (volumineuses, variées et véloces) et nécessitent d'être repensés. De l'autre, les besoins opérationnels des acteurs publics comme privés évoluent vers des formes où l'analyse ne suffit plus et où les approches prédictives, normatives et prescriptives commencent à se développer. Au centre de ces évolutions, la science des données qui occupe une place grandissante dans les pratiques des professionnels comme des chercheurs constitue à la fois un axe dynamique dans le développement de la géomatique et un levier de transformation (Kitchin, 2013 ; Miller et Goodchild, 2015 ; Arribas-Bel et Reades, 2018).

La science des données est l'étude des données qui vise à extraire des informations et des connaissances significatives pour les organisations. Il s'agit d'une approche pluridisciplinaire qui combine des méthodes et des outils issus des mathématiques, des statistiques, de l'intelligence artificielle et de l'informatique, en vue d'analyser, de « faire parler » de grands volumes de données. Mais la science des données n'est pas simplement une nouvelle démarche permettant de résoudre par de nouveaux moyens des questions anciennes, mais bien un nouveau régime de scientificité. Dans ce nouveau paradigme interprétatif, l'idée n'est plus seulement de constater, qualifier, quantifier et interpréter mais davantage d'anticiper et de prédire ce qui va se passer en apprenant des données, en développant des modèles selon une approche guidée par les données (Pentland, 2013 ; Delyser et Sui 2014). A la différence des statistiques, de la géographie quantitative ou de la géomatique qui visent à analyser des phénomènes selon des modèles préétablis pour en tirer des interprétations, la science des données cherche de son côté à produire des modèles pour prédire des phénomènes.

Fortement marquée par l'accroissement exponentiel des données, l'apparition de nouveaux langages et développement de l'intelligence artificielle, la géomatique comme domaine d'expertise et discipline s'est complexifiée, entraînant un besoin de renouvellement et de clarification de ses objets. A l'heure où la masse d'informations produites quotidiennement par les individus et les organisations intègre de plus en plus une dimension spatiale, la géomatique se voit largement questionnée par le développement de la science des données et des approches guidées par les données tant d'un point de vue technique, méthodologique qu'épistémologique. Cette question posée en filigrane il y a 10 ans lors du Géopoint "Controverses et Géographie" interrogeait déjà l'avenir de la géographie à l'heure du Big Data (Audard et al., 2014). Nous proposons aujourd'hui d'actualiser ce questionnement, qui fait plus que jamais débat au sein de notre communauté, en axant la réflexion autour de l'émergence d'un nouveau domaine d'expertise à l'interface de la géographie, de la géomatique et la science des données.

Caractérisé sous les termes de *spatial data science* (Anselin, 2006 ; Pebesma et Bivand 2023), *geospatial data science* (Karimi et Karimi, 2017), *geographic data science* (Singleton et Arribas-Bel, 2021) ou encore *spatial big data science* (Jiang et Shekha, 2017), ce champ de compétences en développement occupe une place grandissante dans les pratiques de professionnels comme au sein du monde académique, principalement anglo-saxon. L'idée d'une science des données géographiques

renvoie à un assemblage de méthodes, de savoirs et de techniques combinant préparation et exploration de données, analyse spatiale, statistique, cartographie, programmation et intelligence artificielle. Au-delà de questionnements relatifs à des outils et des méthodes, cette multiplication d'identités et de sous-groupes à la croisée de plusieurs disciplines permet de repenser la géomatique comme la géographie quantitative à l'heure du numérique et du big data (Franklin, 2023). Ce point est particulièrement important pour renouveler l'image de ces domaines (encore) mal identifiés comme pour en faire la promotion, à la fois dans le cadre académique comme auprès des acteurs opérationnels où les besoins d'expertises en termes d'analyse de données géographiques massives et complexes sont grandissants (Kang et al., 2019).

Au-delà d'un effet de mode ou d'un artefact marketing, il apparaît aujourd'hui important de prendre du recul sur la géomatique et de s'interroger sur son devenir, son positionnement et ses spécificités dans ce nouveau contexte. La science des données géographiques est en effet aujourd'hui mise en avant par de plus en plus d'entreprises spécialisées dans le domaine du géospatial à l'image d'ESRI, CARTO, HERE ou Mapbox. Côté académique, on assiste à l'émergence de centres de recherche dédiés et à l'ouverture de nombreuses formations universitaires spécifiques autour de ce nouveau champ. Les conférences comme les publications (ouvrages, numéros de revues, articles) qui cherchent à explorer et à définir les contours de cette nouvelle « discipline » se multiplient également. De plus, des débats et des controverses autour de la définition, de la pertinence et du développement de la science des données géographiques commencent à émerger au sein de la communauté universitaire, confirmant son statut d'objet de science en construction (Raubal, 2019 ; Scheider et al., 2020 ; Franklin, 2023).

Côté francophone, la question d'une science de données géographiques n'est pour le moment pas explorée, hormis du côté du Québec. En France, la géomatique et la science des données, qui sont deux domaines très dynamiques, restent encore éloignés et peu de passerelles existent entre les communautés. Du côté de la science des données, la dimension spatiale est essentiellement envisagée par le prisme de la cartographie et se limite à des questions de représentation. Et du côté de la géomatique, la science des données n'est pas encore réellement intégrée aux développements actuels et reste envisagée comme un domaine très axé sur les statistiques et l'intelligence artificielle.

Cette situation paradoxale ouvre la voie à une série d'investigations et d'expérimentations dans la mesure où la science des données et la géomatique ont beaucoup en commun et surtout beaucoup à apprendre l'une de l'autre (Goodchild et Longley, 2021 ; Graser et al., 2022). Il existe en effet des synergies à développer entre ces deux mondes, pour à la fois repenser la géomatique à l'heure des données massives et enrichir la science des données d'une réelle dimension géographique (Singleton et Arribas-Bel, 2021). D'un côté, la géomatique peut bénéficier des avancées de la science des données pour le traitement et l'analyse de gros volumes de données spatiales ou l'utilisation des méthodes d'intelligence artificielle. De l'autre, la science des données peut bénéficier des apports de la géomatique pour l'exploration, l'analyse spatiale et la représentation des données géographiques. De plus, au-delà d'enjeux techniques et méthodologiques, l'exploitation de ces masses d'informations spatiales dans la compréhension et l'analyse des sociétés et des territoires nécessite une lecture critique des enjeux épistémologiques en présence.

Nous proposons dans cette position de débat d'appréhender et de discuter des futurs possibles de la géomatique à l'heure de la science des données et du big data dans le contexte francophone à travers trois grands chantiers structurants. Le premier d'ordre épistémologique interroge les évolutions du domaine d'un point de vue théorique et conceptuel. Le deuxième chantier qui porte sur les enjeux techniques et méthodologiques se questionne sur l'instrumentation technique et les évolutions en termes de données et de chaînes de traitements. Enfin, le troisième relatif à la pédagogie s'intéresse aux enjeux de formation initiale et continue des praticiens actuels et futurs.

Chantier épistémologique pour comprendre les évolutions de la géomatique et son positionnement

Le rapport qu'entretient la science des données géographiques aux données n'est pas le même qu'au sein de la géomatique ou de la géographie quantitative. Il n'est en effet plus vraiment question d'interpréter et d'expliquer des phénomènes par l'analyse de données (souvent des échantillons représentatifs) mais davantage de comprendre et de prédire des phénomènes par la mobilisation de grands volumes de données hétérogènes. On ne cherche plus à établir des lois ou des modèles en suivant une approche déductive, mais à faire parler les données pour en ressortir des logiques, des récurrences selon une approche inductive. Ce nouveau paradigme ravive les oppositions entre empirie et théorie, observation et modélisation (Miller et Goddchild, 2015). Plus encore, par le mélange des démarches abductive, inductive et déductive, ces approches guidées par les données questionnent les épistémologies établies (Devisme et al., 2020). De plus, les acteurs au centre de ces évolutions ne sont plus des acteurs publics ou académiques, mais de grandes entreprises privées à l'image des plateformes numériques. Il apparaît en ce sens important de développer une lecture critique de la science des données géographiques et la mettre en perspective avec le développement de la géomatique et les évolutions de la géographie.

Se pose aussi la question du statut d'une science des données géographiques comme objet de science et son rapport aux disciplines existantes. Du fait de son caractère récent, il n'existe en effet pas de consensus à ce sujet. Quand certains y voient un nouveau champ disciplinaire (Singleton, Arribas-Bel, 2012), d'autres la considère comme un sous-domaine de la géomatique (Raubal, 2021) ou des sciences des données (Anselin, 2016 ; Mateu et Stein, 2021), et certains n'y voient qu'une communauté de pratique (Scheider et al., 2019) ou simplement un nouveau concept marketing (Brachman, 2020).

Quelles sont les communautés académiques et professionnelles qui font la promotion de la science des données géographiques ? Quels sont les débats épistémologiques en présence ? La science des données géographiques est-elle une simple déclinaison de la géomatique, un sous-domaine de la science des données ou une nouvelle discipline à part entière ? S'agit-il seulement d'un effet de mode où les évolutions en présence représentent-elles un réel tournant dans le développement de la géomatique ? La science des données géographiques participe-t-elle à un rapprochement ou un éloignement de la géographie ? Ces nouvelles approches centrées autour des données renvoient-elles à des objectifs de production de connaissances ou de reconnaissance ou de justification ? Que devient la géomatique quand ses principes scientifiques sont guidés par les données au lieu des principes classiques comme les modèles et les lois en géographie ? Quelle place pour ces nouvelles approches dans des contextes opérationnels, notamment territoriaux ?

Chantier méthodologique et technique autour d'une science des données géographiques

Au cœur de ces évolutions, les données spatiales doivent être questionnées tant au niveau de leur nature que sur tout leur cycle de vie (collecte, structuration, standardisation, mise en circulation, analyse, représentation). Dans ce contexte où les réflexions sont centrées autour des données, il est important de se questionner d'une part sur les caractéristiques des données massives (accessibilité, représentativité, qualité...). D'autre part, une réflexion est nécessaire sur les liens entre les étapes de préparation, d'exploration, d'analyse et de représentation de données volumineuses et hétérogènes.

D'un point de vue analytique, les méthodes de la géomatique se voient complétées par d'autres techniques issues des domaines des statistiques et de l'informatique (modélisation, classification, régression, clustering). De plus, le recours à des méthodes basées sur l'intelligence artificielle (machine learning, deep learning) interroge sur la spécificité de la dimension spatiale dans ce type d'approche.

L'instrumentation de la science des données géographiques (langages de programmation comme R et Python, environnements cloud comme AWS ou Google Big Query, architectures distribuées comme Spark ou hadoop...) doit également être investiguée pour à la fois comprendre ses spécificités et son écosystème technique. L'intégration et la prise en compte des caractéristiques des données géographiques (systèmes de projection, topologie, approches floues...) comme des méthodes d'analyses spatiales et de cartographie doivent également être interrogées. Enfin la science des données géographiques qui s'inscrit dans un contexte d'ouverture des données, des outils et des méthodes pose une série de questions sur la place des logiciels libres (Anselin et Rey, 2022) et les liens avec la science ouverte, notamment en matière de partage et de reproductibilité de la recherche (Brunsdon et Comber, 2021).

Quelles sont les méthodes d'analyse spatiale mobilisées au sein de la science des données géographiques ? Quels sont les modes de représentations cartographiques utilisés ? Les méthodes et les principes de la science des données sont-ils compatibles et pertinents dans le cadre de l'analyse spatiale ? Les méthodes et les principes de la géographie et de l'analyse spatiale sont-ils solubles dans la science des données géographiques ? Comment transposer les méthodes d'intelligence artificielle aux données géographiques ? Quelles sont les spécificités de la dimension spatiale des données dans ce type de démarche ? Quels sont les verrous techniques et méthodologiques en présence ? Quels sont les outils et langages de la science des données géographiques ? Quelles sont les communautés de pratique en présence ? Quelle place pour la science ouverte au sein de la science des données géographiques ? La science des données géographiques est-elle synonyme d'ouverture et de reproductibilité des méthodes ?

Chantier pédagogique sur la formation des praticiens actuels et futurs à la science des données géographiques

Dernier chantier à enjeux, celui de la formation à la science des données géographiques apparaît très important dans une réflexion prospective sur l'enseignement de la géomatique et plus largement de la géographie à l'heure du big data. En effet, les besoins du monde professionnel (au sein du secteur privé notamment) évoluent rapidement. De plus en plus de structures sont à la recherche de nouveaux profils à la fois capables de croiser, de structurer, d'analyser et de représenter de gros volumes de données géographiques, voire de proposer des approches prédictives. Toutefois, dans la pratique, les pouvoirs publics comme les entreprises privées qui manquent d'expertises internes connaissent des difficultés à recruter ces nouveaux profils aux compétences rares et recherchées. Les offres d'emploi comme les stages combinant géomatique et science des données commencent à se développer dans divers champs d'application (mobilité, géomarketing, sécurité, assurance...) et poussent à repenser l'offre de formation en géomatique pour être le plus en lien avec les attentes du marché de l'emploi et favoriser l'insertion professionnelle. La question de la formation continue se pose également dans la mesure où les praticiens ont besoin de monter en compétences sur ces nouveaux sujets en termes de connaissances,

Quels sont les contenus et les objectifs des formations en science des données géographiques existantes dans le monde anglo-saxon ? La mise en place de formations en sciences des données géographiques est-elle pertinente en France ? Quelles sont les attentes du monde opérationnel en termes de nouvelles compétences des géomaticiens ? Quels sont les nouveaux enseignements à développer pour former à la science des données géographiques ? Quelle place pour l'enseignement de la géographie quantitative dans ce type de cursus ? Comment trouver le bon équilibre entre des cours techniques et des enseignements méthodologiques ? Quelles sont les passerelles à développer entre les masters en géomatique en statistiques et en informatique ? La formation à la science des données géographiques doit-elle s'effectuer au sein de structures en SHS ?

Orientations bibliographiques

- Anselin, L. (2016). Spatial data science. In *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*, 1-6.
- Anselin, L., & Rey, S. J. (2022). Open source software for spatial data science. *Geographical Analysis*, 54(3), 429-438.
- Arribas-Bel, D., & Reades, J. (2018). Geography and computers: Past, present, and future. *Geography Compass*, 12(10), e12403.
- Audard, F., Carpentier, S., & Oliveau, S. (2014). Les « big data » sont-elles l'avenir de la géographie [théorique et quantitative]? *Géopoint 2014 « Controverses et géographies »*, Avignon.
- Brachman, M. L. (2020). Don't forget about geography. *Journal of Spatial Information Science*, (21), 263-266.
- Brunsdon, C., & Comber, A. (2021). Opening practice: supporting reproducibility and critical spatial data science. *Journal of Geographical Systems*, 23(4), 477-496.
- Comber, L., & Brunsdon, C. (2020). *Geographical data science and spatial data analysis: An introduction* in R. Sage.
- DeLyser, D., & Sui, D. (2014). Crossing the qualitative-quantitative chasm III: Enduring methods, open geography, participatory research, and the fourth paradigm. *Progress in Human Geography*, 38(2), 294-307.
- Devisme, L., Guérin-Pace, F., & Voiron-Canicio, C. (2020). Big cities, smart data? Les conséquences épistémologiques et pratiques de la généralisation des univers numériques pour la recherche urbaine. In Adisson F. (dir.) ; et al. *Pour la recherche urbaine*, CNRS Éditions, p. 51-65.
- Franklin, R. (2023). Quantitative methods III: Strength in numbers?. *Progress in Human Geography*.
- Goodchild, M. F., & Longley, P. A. (2021). *Geographic information science*. In *Handbook of Regional Science*. Berlin, Springer, pp. 1597-1614.
- Graser, A., Heistracher, C., & Pruckovskaja, V. (2022). On the role of spatial data science for federated learning. In *Spatial Data Science Symposium 2022 Short Paper Proceedings* (pp. 1-8)
- Jiang, Z., & Shekhar, S. (2017). *Spatial big data science*. Schweiz: Springer International Publishing AG.
- Kang, W., Oshan, T., Wolf, L. J.. (2019). A roundtable discussion: Defining urban data science. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(9), 1756-1768.
- Karimi, H. A., & Karimi, B. (Eds.). (2017). *Geospatial data science techniques and applications*. CRC Press.
- Kitchin, R. (2013). Big data and human geography: Opportunities, challenges and risks. *Dialogues in human geography*, 3(3), 262-267.
- Mateu, J., & Stein, A. (2021). Introduction to the special issue Towards Spatial Data Science. *Spatial statistics*, 42, 100466.
- Miller, H. J., & Goodchild, M. F. (2015). Data-driven geography. *GeoJournal*, 80, 449-461.
- Pebesma, E., & Bivand, R. (2023). *Spatial data science: With applications in R*. CRC Press.
- Pentland, A. S. (2013). The data-driven society. *Scientific American*, 309(4), 78-83.
- Raubal, M. (2019). It's the Spatial Data Science, stupid!. In *Spatial Data Science Symposium*. Center for Spatial Studies at the University of California.
- Scheider, S., Nyamsuren, E., Kruiger, H., & Xu, H. (2020). Why geographic data science is not a science. *Geography compass*, 14(11).
- Singleton, A., & Arribas-Bel, D. (2021). Geographic data science. *Geographical Analysis*, 53(1), pp. 61- 75.

Dimension et mesure : horizon des géographes

Geoffrey Mollé - Docteur en géographie de l'université Lyon 2 Lumière, chercheur associé au laboratoire Environnement, Ville, Société (EVS-UMR5600), assistant de recherche dans le projet SAPHIR (Y.Fijalkow et Y.Wilson, CRH-LAVUE ; ESPI2R).

Les géographes n'ont pas l'exclusivité des « schèmes spatiaux » lorsqu'il s'agit de décrire, d'analyser et d'expliquer les phénomènes (Besse et al., 2017). Leur rôle pionnier dans le « tournant spatial » (Volvey et al., 2021) est ignoré dans les récentes anthologies des sciences sociales (Lemieux (dir.), 2017). Le commerce épistémologique avec l'histoire (Braudel, 1958), la sociologie (Mucchielli, 1998) et l'anthropologie (Blanckaert, 2004) semble moins vigoureux. La discipline apparaît marginalisée par sa condition de « science-limite » (Jaspers, 1936). Longtemps positionnée à l'interface des sciences sociales et naturelles, le potentiel fédérateur de la géographie serait important à l'heure de l'Anthropocène (Groupe Cynorrhodon, 2020 ; Latour 2015). Mais comment exploiter ce potentiel ? Sur la base de quels outils théoriques ?

Je propose de considérer que l'apport spécifique des géographes à la connaissance réside dans le maniement de deux catégories conceptuelles transfigurées par l'institution du concept d'« espace ». L'une d'elles est connue, la mesure ; l'autre est plus insaisissable, la dimension.

À l'instar des anglophones, on pourrait parler d'un « *dimensionnal turn* » en SHS. Cette expression toutefois, n'irait pas dans le sens d'un énième tournant, mais viendrait plutôt caractériser cette tendance épistémologique générale amorcée depuis les années 1960-1970 mettant successivement en lumière des variables à la fois autonomes et transversales des phénomènes (tournant culturel, tournant spatial, tournant matériel, émotionnel etc.). Avec les questionnements en géographie sociale sur la « dimension spatiale des sociétés » (Ripoll, 2021 ; Veschambre, 2006 ; Lévy et Lussault, 2003), l'essor des *vertical/volumetric studies* (McNeil, 2019 ; Graham, 2016) et l'élargissement du champ des « *politics of scale* » (Debarbieux, 2021), la notion de « dimension » émerge comme un outil commode quoiqu'implicite pour relier les entités distinctes qui s'enveloppent les unes les autres (Merleau-Ponty, 1945). En même temps, cette notion polysémique reste teintée d'un sens métrique adossée à un rapport de valeur. Relever la dimension spatiale des phénomènes, n'est-ce pas en effet signifier à quel point il est pertinent de les attraper par-là ?

J'ai montré dans ma thèse que l'ambiguïté que l'on trouve dans les dictionnaires entre dimension et mesure remontait au moins à la Renaissance. L'écart entre les étymologies indo-européennes de la dimension et de la mesure s'est dissipé avec l'émergence de l'« espace de représentation » de la perspective, matricielle dans l'institution de l'« espace méthodologique » des sciences et la philosophie du XVII^e siècle (Besse, 1995). D'où l'intérêt de regarder sous les « schèmes spatiaux », en considérant qu'ils sont issus de schèmes plus fondamentaux, des schèmes métriques et dimensionnels. J'ai cherché à démontrer leur intérêt dans la compréhension de l'accumulation des savoirs et l'évolution des concepts géographiques, de la symbiose entre la géographie, l'astronomie et la géométrie grecques (Aujac, 1973 ; Jacob, 1986) au bouillonnement épistémologique du XIX^e siècle (Pelletier, 2018) en passant par le dialogue avec la physique lors de la révolution copernicienne (Besse, 2003). Commun à toutes les sciences modernes, le concept de « milieu » présentait une forme d'équilibre entre la

conception continue/contigüe et topographique/topologique des phénomènes qu'évoque le couple mesure/dimension et que s'est forgée la géographie sur le temps long en réfléchissant sur les écarts et les positions.

La rivalité mésologie/écologie du tournant du XX^e siècle (Pelletier, 2018), les débats sur l'introduction des modèles de l'économie spatiale avant les années 1940 (Robic, 2003), la scission entre les géographies phénoménologiques (Berque, 1990 ; Tuan, 1977 ; Dardel, 1952) et les géographies structurales (Brunet, 1980 ; Hagget, 1965) ...Ces conflits n'ont pas été résolus par la pensée spatiale parce qu'ils prennent leur source plus en profondeur, dans la complémentarité mesure/dimension. Sans la dimension et son sens transversal de la position, la mesure constitue son propre référentiel, abstrait, coupé du sens des lieux qui résulte des modes de relation entre les corps et leurs milieux. Sans la mesure et son échelle de grandeur, la dimension est relativiste voir nihiliste et peu généralisable pour comprendre l'écoumène, en tant que milieu des sociétés.

Les géographes d'aujourd'hui sont pris entre l'interface Espace-Société et Nature-Société. Ils ne peuvent que s'appuyer sur l'héritage de la pensée spatiale. À mon avis, le couple mesure/dimension constitue un horizon pour aller au-delà. Je propose deux perspectives.

- La première est analytique, celle d'une « axiomatique » (Hagget, 1965). Ses trois concepts de base sont partagés par tous les géographes : (1) la « position », tirée de l'étymologie de la « dimension », qui vient caractériser la localisation des milieux collectifs et individuels ; (2) la « grandeur », tirée de l'étymologie de la « mesure » ; qui vient caractériser leurs tailles à plusieurs échelles (3) la « limite », qui fait le lien entre les deux, et qui caractérise les zones de tension. Les autres en dérivent (lieu, milieu, mouvement, trajectoire, rythme, horizon, verticalité, volume...). Qu'est-ce que la géographie sinon la science du sens des limites, de la grandeur des écarts et du positionnement des existences ?
- La deuxième perspective est plus empirique et relève d'une hypothèse que je souhaiterais vous soumettre. Ma recherche doctorale a été pensée comme une réponse à la synchronie entre l'intensification de la production des tours dans le monde, la reconsidération de l'habiter en hauteur et le « tournant vertical » des *urban studies*. J'ai finalement supposé et cherché à démontrer que la dimension, en tant que schème de perception et d'action, s'exprime aujourd'hui préférentiellement à celui de la mesure dans les stratégies de recherche sur l'urbain, de transformation effective de l'environnement et dans les préférences résidentielles. Autrement dit, d'une valeur diminuée des rapports de grandeur ou de taille, subsumés sous les rapports de position dans l'orientation des programmes scientifiques, des politiques d'aménagement au sens large, et dans les goûts pour l'habitat.

À l'aune des échanges que nous avons tout au long du colloque, il semble effectivement que la tendance des chercheurs va dans le sens d'un effort de caractérisation, de représentation et d'analyse de ces rapports de position, au sens large de ce terme, position professionnelle, politique, position dans l'environnement, coordonnées xy surtout à travers les cartes, mais aussi z, bref « géopoint ».

Bibliographie indicative

- AUJAC Germaine, 1973, « Astronomie et géographie scientifique dans la Grèce ancienne », *Bulletin de l'Association Guillaume Bude : Lettres d'humanité*, n°32, p. 441-461.
- BERQUE Augustin, 2000, *Ecoumène. Introduction à l'étude des milieux humains*, Belin, Paris, 272 p.
- BERQUE Augustin, 1990, *Médiance. De milieux en paysage*, coll. Géographiques, Montpellier, GIP Reclus, 163 p.
- BESSE Jean-Marc, CLERC Pascal, ROBIC Marie-Claire, FEUERHAHN Wolf, ORAIN Olivier, "Qu'est-ce que le « spatial turn » ?", *Revue d'histoire des sciences humaines*, 30 | 2017, 207-238.
- BESSE, Jean-Marc, 2004, « Le lieu en histoire des sciences : hypothèses pour une approche spatiale du savoir géographique au XVIe siècle ». In: *Mélanges de l'École française de Rome. Italie et Méditerranée*, tome 116, n°2. 2004. La culture scientifique à Rome à l'époque moderne. Pouvoir local et factions (XVe-XIXe siècle). *Città e ambiente. Ospedali e sanità*. pp. 401-422.
- BESSE Jean-Marc, 2003, *Les grandeurs de la Terre. Aspects du savoir géographique à la Renaissance*, Lyon, ENS Editions, 420 p.
- BESSE Jean-Marc, 1995, « L'espace de l'âge classique, entre relativité et représentation », *L'espace géographique*, vol.24, n°4, p. 289-301, URL : https://www.persee.fr/doc/spgeo_0046-2497_1995_num_24_4_3408.
- BLANCKAERT Claude, 2004, « Géographie et anthropologie : une rencontre nécessaire (XVIIIe-XIXe siècle) », *Ethnologie française*, (Vol. 34), p. 661-669. DOI : 10.3917/ethn.044.0661. URL : <https://www.cairn.info/revue-ethnologie-francaise-2004-4-page-661.htm>
- BRAUDEL Fernand, 1958, « Histoire et Sciences sociales : La longue durée ». In: *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*. 13^e année, N. 4, p. 725-753. DOI : <https://doi.org/10.3406/ahess.1958.2781>
- BRUNET Roger, 1980, « La composition des modèles dans l'analyse spatiale », In: *L'Espace géographique*, tome 9, n°4, p. 253-265. DOI : <https://doi.org/10.3406/spgeo.1980.3572>
- DAMISCH Hubert, 1983, « L'espace, le temps et les arts de l'espace », in MINOT Gilles, *L'espace et le temps aujourd'hui*, Paris, Seuil, p. 233-246.
- DARDEL Eric, 1952, *L'Homme et la Terre. Nature de la réalité géographique*, Paris, Presses Universitaires de France, 133 p.
- DEBARBIEUX Bernard, 2021, « Réfléchir sur l'échelle, débats sur les "politics of scale" », In: *Géographies anglophones*. Nanterre : Presses Universitaires de Paris Nanterre, p. 67-79.
- GRAHAM Stephen, 2016, *Vertical: the city from Satellites to Bunkers*, Londres et New-York, Verso Books, 416 p.
- GROUPE CYNORHODON (coord.), 2020, *Dictionnaire critique de l'anthropocène*, Paris, CNRS éd., 928 p.
- HAGGETT Peter, 1965, *Locational analysis in human geography*, Arnold, 339 p.
- JACOB Christian, 1986, « Cartographie et rectification. Essai de lecture des *Prolégomènes* de la *Géographie* de Strabon », p. 27-64, in : *Strabone. Contributo allo studio della personalità e dell'opera*, vol. II, a cura di G. Maddoli, Perugia.
- JASPERS Karl, 1978 [1936], *Raison et existence, cinq conférences*, traduit. de l'allemand par Robert Givord, Presses Universitaires de Grenoble, 1978, p. 59-60.
- LATOURET Bruno, 2015, *Face à Gaïa - Huit conférences sur le nouveau régime climatique*, Paris, éd. La Découverte, « Les empêcheurs de tourner en rond », 400 p.
- LEMIEUX Cyril (dir.), 2017, *Pour les sciences sociales. 101 livres*, Paris, EHESS, series: « En temps et lieux », 350 p., ISBN : 978-2-7132-2722-6.
- LÉVY Jacques, LUSSAULT Michel, (2003), *Géographie. Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Paris : Belin, 399 p.
- MCNEILL Donald, 2019b, 'The volumetric city', *Progress in Human Geography*, vol. 44(5), p. 815-831.

MERLEAU-PONTY Maurice, 1945, *Phénoménologie de la perception*, Paris, La Librairie Gallimard, NRF, 531 p.

MOLLE Geoffrey, 2023, *Dimensionnement urbain et hauteur des milieux. Enquête mésologique sur les conditions de production et d'habitation des tours résidentielles en France*, thèse de doctorat en géographie, université Lyon 2 Lumière, 535 p.

MUCCHIELLI Laurent, 1998, *La découverte du social. Naissance de la sociologie en France (1870-1914)*. La Découverte, « Textes à l'appui », URL : <https://www.cairn.info/decouverte-du-social--9782707128263.htm>

PELLETIER Philippe, 2018, « Mésologie, géographie, écologie : enjeux critiques », in AUGENDRE Marie, LLORED Jean-Pierre, NUSSAUME Yann (dir.), *La mésologie, un autre paradigme pour l'anthropocène ? Autour et en présence d'Augustin Berque*, Paris, Hermann, « Colloque de Cerisy », p. 51-70, URL : <https://www.cairn.info/la-mesologieun-autre-paradigme-pour--9782705695675-page-51.htm>.

RECLUS Elisée, 1905, *L'Homme et la Terre*, Paris, Librairie Universelle.

RIPOLL Fabrice et al., 2021, *Géographie sociale. Approches, concepts, exemples*, Paris, Armand Colin, « Coursus », 216 p.

ROBIC Marie-Claire, 2003, « La ville, objet ou problème ? La géographie urbaine en France (1890-1960) », *Sociétés contemporaines*, no 49-50, p. 107-138, URL : <https://www.cairn.info/revue-societescontemporaines-2003-1-page-107.htm>.

TUAN Yi FU, 1977, *Space and place*, Arnold, 226 p.

VESCHAMBRE Vincent, 2006, « Penser l'espace comme dimension de la société : Pour une géographie sociale de plain-pied avec les sciences sociales », SECHET Raymonde et VESCHAMBRE Vincent, *Penser et faire la géographie sociale. Contributions à une épistémologie de la géographie sociale*, Presses universitaires de Rennes, 397 p.

VIDAL DE LA BLACHE Paul, 1902, « Les conditions géographiques des faits sociaux », *Annales de Géographie*, t. 11, n°55, p. 13-23.

VOLVEY Anne, STOCK Mathis, Calbérac Yann, 2021, « Spatial Turn, tournant spatial, tournant géographique », In : *Mouvements de géographie. Une science sociale aux tournants*, CLEMENT Vincent, STOCK Mathis, VOLVEY Anne (dir.), Presses Universitaires de Rennes, 368 p.

Espace, épidémiologistes et Géographes de la Santé

Sandra Pérez

A l'heure de la pluri, inter, trans-disciplinarité, la géographie devrait-elle craindre l'emploi de ses techniques et outils par d'autres sciences ? Peut-elle se dissoudre dans celles-ci ? Pour répondre à ces questions, je vais m'appuyer sur mon domaine de recherche, la Géographie de la santé qui est un champ relativement nouveau de notre discipline. La Géographie de la Santé traite de la façon dont l'espace (géographique) interagit avec les individus, leurs corps, pour produire des effets sur leur santé. Ces effets sont généralement étudiés du point de vue négatif. L'espace peut entrer en relation par le biais de la distance (rugosité, frein) engendrant par exemple une plus grande difficulté d'accès aux soins, ou bien par le voisinage (contamination dans le cas des virus, proximité avec des axes routiers, un aéroport, des industries polluantes). Les recherches menées sont florissantes et concernent des thèmes aussi divers que la propagation de maladies infectieuses ou vectorielles, l'accessibilité aux soins, ou bien encore la recherche de déterminants environnementaux dans l'émergence d'une pathologie (thèmes non-exhaustifs). L'analyse spatiale à travers l'étude du voisinage, de la diffusion, de l'interaction spatiale, de l'autocorrélation, de l'interpolation, des cheminements, de l'accessibilité, est tout naturellement au cœur de ces recherches.

Le rapport à l'espace des différents auteurs peut aller de l'espace considéré comme un simple support des variables qui s'y déploient, à un espace reconnu comme un véritable acteur, porteur d'attributs spécifiques qui vont influencer dans un sens soit positif (amplification, facilitation...), ou au contraire négatif (barrière, contrainte, atténuation...), le phénomène, ou la pathologie étudiée.

Un des problèmes de notre discipline c'est que l'espace ne peut pas être expérimenté dans le sens scientifique du terme, il ne peut pas bénéficier d'essais contrôlés randomisés (ECR), il est difficile d'introduire dans un espace réel des éléments dont on voudrait mesurer directement les effets. Or, la causalité scientifique repose sur l'expérimentation, où les conditions initiales sont contrôlées, randomisées, et au sein de laquelle nous pouvons mesurer l'effet d'un nouvel élément, qui viendrait modifier ces conditions initiales.

Par ailleurs, la science recherche des réponses univoques du type « telle cause produit tel effet », et si possible linéaires afin d'en assurer la prédiction. Or, par exemple en santé environnementale, les réponses sont la plupart du temps équivoques, car le résultat peut venir de multiples causes (multifactoriel). Dès lors, la complexité, la méconnaissance rend (pour l'instant) difficile, voire impossible toute projection sérieuse dans le futur. Par contre, les investigations présentes peuvent être vérifiées sur le passé dans le cadre d'études rétrospectives, où nous observons des pathologies actuelles, fruits d'une exposition plus ancienne (abduction).

Depuis 2005 et les travaux de référence de Christopher Wild sur le concept d'exposome, des épidémiologistes plaident pour un développement de mesures visant à évaluer, quantifier l'environnement de patients à la même hauteur que les études qui ont été déployées pour mesurer le génome. « *There is a desperate need to develop methods with the same precision for an individual's environmental exposure as we have for the individual's genome. I would like to suggest that there is a need for an "exposome" to match the "genome."* (Wild, 2005). De nombreuses études en Europe et dans le monde se concentrent à l'heure actuelle sur l'exposome. Il s'agit d'études complexes, très fines, faisant appel aux omiques (métabolomique, protéomique, adductomique, transductomique...), elles sont menées la plupart du temps par des épidémiologistes, ou bien des (éco)toxicologues (Slama, 2015). Leur objectif est d'avancer dans la connaissance des doses-réponses, en étudiant finement l'exposition de groupes d'individus suffisamment homogènes pour distinguer la variabilité interindividuelle (même sexe et âge par exemples), et suffisamment

hétérogènes (exposés versus non exposés) pour percevoir les effets de la variabilité d'exposition. Dans la version idéalisée de l'exposome celui-ci devrait pouvoir couvrir l'ensemble des expositions environnementales d'un individu tout au long de sa vie. Nous voyons là toute la difficulté à réaliser cela à la fois pour des raisons éthiques, de vie de la recherche au sein des laboratoires (conduire une même étude qui mobiliserait toutes les énergies pendant plus de 80 ans), que de traitements et d'analyses de données. Cependant, certaines cohortes (Elfe en France, Sapaldia en Suisse) se sont engagées sur ce chemin. Et le plus important n'est peut-être pas d'atteindre l'objectif visé que de cheminer, de voir comment on peut « attaquer » cet objet de la façon la plus efficace possible, car nous ne pouvons pas pour l'instant étudier sérieusement l'exposome dans son entièreté (hors métabolomique), la tâche est titanesque.

De plus, ne serait-ce que dans le domaine de la pollution de l'air nous ne connaissons pas encore tous les mécanismes d'interactions entre les multiples polluants auxquels les individus sont exposés (effets cocktails), et pour certains polluants les valeurs toxiques de référence ne sont même pas établies. Si des incertitudes subsistent à ce niveau il ne sera dès lors pas possible de projeter dans le temps (prospectif) les relations trouvées. Mais, le concept d'exposome a le mérite de faire sauter les silos entre les spécialistes de la pollution de l'air, du sol, des eaux, du biotope, et de poser le problème de la multi-exposition, qui plus est cumulative. Ce faisant ces spécialistes doivent travailler ensemble et mettre leurs connaissances en commun afin de voir dans un premier temps ce qui se passe aux **interfaces**, comment se font les transferts de contamination air-sol, sol-air, sol-eau, suivant quels mécanismes ? Et comment les populations peuvent être exposées (voies de contamination). Une adaptation raisonnée de ce concept à la réalité est également de porter l'attention à des fenêtres d'exposition critiques à certains moments de la vie des individus (qui pourraient avoir des effets sur le long terme), ainsi qu'aux périodes sensibles (susceptibles d'effets importants) (Ben-Shlomo et Kuh, 2002). Les deux (critiques et sensibles) se succédant au fil de la vie, et constituent ce que l'on appelle des chaînes de risque (Vineis et al., 2017). Néanmoins, si ce n'est pas encore un concept tout à fait opérationnel, le concept d'exposome a le mérite d'organiser la pensée, les réflexions, de montrer le cap, de fédérer les énergies autour d'un but commun.

Nous nous plaçons en tant que géographe dans une autre perspective que le concept englobant d'exposome. En effet, si ce concept est performant pour passer en revue tous les facteurs auxquels un individu doit faire face au cours de sa vie, ou bien lors de fenêtres d'exposition critique (pré ou postnatales), il n'a pas pour objet de **catégoriser différents espaces de vie entre eux**. Si ces études mettent bien en relation des niveaux d'exposition différents et des effets proportionnés, elles investiguent moins le « **pourquoi là ?** » si cher aux géographes. **L'espace est dans ces recherches un facteur parmi les autres, mais ce n'est pas LE facteur déterminant**. En effet, si nous prenons les publications de l'étude européenne « *Health and Environment-wide Associations based on Large population Surveys*, HEALS) elles ont trait à des polluants particuliers, dont les impacts ont été mesurés sur des populations cibles, en des points particuliers, mais sans qu'aucune règle généralisable au niveau des espaces n'en soit pour l'instant sortie, ce qui est bien entendu normal compte tenu de la complexité de ces recherches, et de la spécificité de chacun des espaces d'étude, nécessaires pour évaluer la diversité des doses réponses potentielles.

Or, en tant que géographe ce qui nous intéresse c'est de comprendre la capacité de l'espace géographique à induire des pathologies en raison de caractéristiques intrinsèques qu'il posséderait *in se, per se*. Cela en vue de catégoriser les espaces entre eux, dans l'espoir d'en dégager une théorie. En tant que géographe je fais donc l'hypothèse que certains lieux (espaces pathogènes) possèdent des caractéristiques suffisamment fortes pour entrer dans les corps, et être alors en capacité de générer des pathologies. Par caractéristiques fortes, il est par exemple question d'intensité, de temporalité (pollution chronique), de dangerosité, de multiplicité des polluants, mais aussi de topographie, de vents, de configuration du réseau viaire etc. Pour approcher cela, moi-même j'utilise un modèle issu des sciences physiques à travers l'Energie Potentielle

Gravitationnelle, et cela ne fait pas de moi pour autant une physicienne. Il est normal que dans le contexte actuel d'ouverture des disciplines et mises en commun de connaissances, d'outils, le périmètre des unes et des autres soit plus mouvant, mais si les épidémiologistes viennent eux aussi à considérer l'espace comme LE facteur déterminant, c'est une bonne nouvelle ! Car ils seront devenus Géographes !

Pour un projet théorique en géographie

Denise Pumain, Professeur émérite à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Je propose d'essayer dans ce débat de discuter de manière constructive des réponses possibles à la question judicieusement posée dans l'appel de ce colloque : « faire exister une aspiration théorique ». L'appel à participation de ce Géopoint 2024 qui dépasse le sujet des interrogations sur la définition de la géographie pour suggérer une réflexion sur son projet révèle une maturité et un progrès certains dans la façon de rechercher des justifications à la discipline. Il y a de multiples façons de faire de la science, toutes contribuent à sa progression si elles sont pratiquées dans un esprit de partage et de cumulativité des savoirs, plutôt que de stratégies distinctives qui ont des effets séparatifs et exclusifs. Construire des théories scientifiques pour expliquer la diversité du monde et anticiper ses évolutions, en produisant des explications appuyées sur des observations et soutenues par des modèles est une démarche fructueuse que les géographes n'ont pas oubliée. J'énumère ci-dessous quelques propositions qui donnent souvent lieu à débat.

1 Ne pas confondre théorie et engagement, ni théorie et formalisation

Il me semble que sur le fond on peut reprendre en 2024 les termes du projet de construction théorique pour la géographie tel que l'énonçait Sylvie Rimbert (1972). En substance il s'agit de combattre la difficulté de la géographie à monter en généralité, en donnant la priorité à une théorie explicative, en testant la qualité des explications par confrontation entre théorie et observation avec recours à des méthodes mathématiques et informatiques et en convenant que des théories générales peuvent rapprocher les sciences et qu'il est important de travailler aux frontières entre les disciplines. Dès les débuts héroïques de cette « révolution » (Pumain, Robic 2002) certains critiquaient un « fétichisme de l'espace » (Lévy 1978), niaient la possibilité de construire une théorie géographique en tant que telle et préconisaient comme seul possible le recours à une théorie sociale générale. Dès 1989 Edward Soja, tout en développant une « géographie postmoderne » bien éloignée des méthodes quantitatives, renversait cette proposition en énonçant la thèse du « virage spatial » (*spatial turn*) qui se serait introduit dans toutes les sciences sociales. Plus tard, d'autres se sont employés à dénoncer le projet de la « géographie théorique et quantitative » pour son « positivisme » (Staszack 2001), ou parfois à le critiquer pour son « réalisme » (Orain 2009).

Les philosophes et les épistémologues discutent des options et des postures entre science, idéologie, et engagement. La diversité des opinions à ce sujet n'est pas forcément un obstacle à la mise en commun et à la discussion des théories. Même s'il est certain que chaque personne est porteuse de représentations qui lui sont propres et qui mêlent des préjugés et des convictions personnelles tout imprégnées de représentations socialement construites, il me semble qu'on peut être pragmatique, en distinguant au moins partiellement théorie et idéologie. On peut tâcher de s'entendre pour séparer la science de l'engagement, ou considérer que la science est un engagement (selon une approche constructiviste, il s'agit de formuler des propositions qui font consensus). La difficulté de l'exercice est peut-être suffisante pour s'en tenir là, provisoirement. Les discussions sont fécondes quand on accepte d'examiner très précisément les prémisses d'un raisonnement scientifique et les détails de sa méthodologie. Une condition préalable me semble être qu'il faut modestement admettre le caractère partiel, provisoire et révisable des théories plutôt qu'imaginer raser la table ou produire une innovation de rupture.

Les théories de la géographie s'inscrivent parmi celles des sciences sociales, relèvent-elles d'une logique qui leur serait particulière ? J'ai eu l'occasion de discuter avec Jean-Claude Passeron de son plaidoyer pour le « raisonnement sociologique » (Passeron 1991), qui serait plus particulièrement adapté aux « sciences historiques ». Il a bien voulu convenir avec moi que cette posture est une tactique provisoire, destinée à mettre en évidence la complexité particulière des sciences sociales. Mais cette posture de mise à distance des sciences sociales par rapport à la démarche scientifique des sciences dures, supposée « classique », (et il est vrai considérablement amendée depuis trois quarts de siècles par des considérations liées à la complexité et à ses incertitudes), ne tient pas si on se pense, biologiquement, intellectuellement et socialement, comme membre à part entière d'une humanité qui partage des processus cognitifs, au point de pouvoir établir et communiquer avec des langages communs.

Les oppositions binaires comme celle établie entre réalisme et constructivisme aident à mieux comprendre l'histoire des sciences, mais elles ne nous aident guère quand elles portent des condamnations. Une construction théorique a toujours une part de réalisme face à des observations partageables et une part de construction plausible ou acceptable, dans un pragmatisme entre les ambitions explicatives et les capacités démonstratives (Sanders 2011). Une autre alternative opposant méthode de raisonnement inductive ou déductive est aussi peu féconde, même si on tente de la résoudre en invoquant des méthodes abductives ou rétroductives (Mukumbang 2023). L'exemple des deux façons historiquement différentes de produire de la théorie en économie et en géographie me semble à cet égard éclairant, je pourrai le développer en concluant sur l'identité des niveaux d'exigence requis, mais avec des moyens et des résultats différents.

A un autre extrême, des auteurs tentent de réduire la démarche de théorisation en géographie à ses versions les plus formelles, qu'elles soient, rarement, du côté de la philosophie analytique (on peut penser parmi les géographes à Augustin Berque (1994) ou Henri Reymond (2009)), et plus souvent du côté de spécialistes des sciences dures devenus spatialistes, souvent physiciens, à la recherche de formulations universelles exclusivement mathématisées ou instrumentales (Bettencourt et West 2010). Je peux développer ici avec un peu plus de détails l'exemple des lois d'échelle, qui n'ont finalement qu'une faible valeur ajoutée pour les théories urbaines, si on rapporte les avancées qu'elles ont permises pour comprendre, évaluer et prédire la dynamique des villes à l'énorme retentissement médiatique qui leur a été donné.

2 Utiliser la puissance des masses de données et du calcul distribué

Comme il est bien indiqué dans l'exposé du colloque, les objectifs de la construction théorique en géographie doivent évoluer pour s'adapter au contexte contemporain de la production scientifique. Le contexte inédit d'abondance des données, de prolifération des applications de la géographie dans tous les domaines de la vie quotidienne pourrait conduire paradoxalement les adeptes de cette discipline dominée à nier leur existence et leur projet en considérant que banalisation vaut absolue dévalorisation.

Pour dépasser la simple « spatialisation des phénomènes sociaux et environnementaux », il est possible de mieux articuler le spatial et le temporel, en étant attentif aux dynamiques, en gardant l'optique de la fréquence relative des processus, et en tirant le meilleur parti possible de la diversité des échelles d'étude accessibles. La génération précédente avait exploré le multivarié, c'est le multi-échelle qui devient la source de progrès pour les jeunes chercheurs d'aujourd'hui (Fang et al 2018 ; Caruso et al 2023 ; Achter et al 2024).

L'adéquation à des données empiriques est toujours nécessaire pour valider une théorie, mais elle n'est pas suffisante. L'expérimentation sur les hypothèses interprétatives, avec des modèles qui reconstruisent les évolutions présumées des variables localisées, est une méthode qui vient d'être considérablement enrichie par l'emploi des algorithmes génétiques et du calcul distribué. Deux gros progrès ont été apportés récemment par l'usage des plates-formes de modélisation : on peut évaluer avec suffisamment de précision la diversité des comportements du modèle exprimant les hypothèses, et encadrer son domaine de validité en estimant les domaines de variation des valeurs des paramètres qui produisent des trajectoires plausibles (Bretagnolle, Pumain 2010) ; on parvient à une validation complémentaire de la démarche modélisatrice : faire connaître non seulement quelles hypothèses sont suffisantes pour reproduire l'évolution observée, mais aussi quelles sont celles qui sont nécessaires, et lesquelles sont superfétatoires, car n'influant pas sur la trajectoire des entités géographiques, toutes choses égales quant aux autres hypothèses du modèle (Schmitt et al 2015 ; Pumain 2020).

3 Danser à travers les échelles

Nous vivons une époque formidable. Les « objets de connaissance spécifiques et transversaux » de la géographie restent bien les localisations, absolues et relatives, le « pourquoi là et pas ailleurs », les effets de frontière et de discontinuité, mais aussi les asymétries et les inégalités dans l'évolution et la recomposition des territoires, les décalages entre les mises en espace des représentations individuelles et collectives. Les objets ne sont plus particuliers à la géographie ? Il s'invente des « géoarchéologies » (Morhange & Provensal 2007), des « géopatrimoines », des économies géographiques et des géohistoires, et alors ? Le géoréférencement quasi universel qui encadre toute la vie des utilisateurs de smartphones et d'internet n'explique rien par lui-même, mais il prête à nos théories de nouvelles occasions de les renforcer et de les compléter. Il devient possible de mieux connaître les processus de micro-échelle, celle des individus, des bâtiments et des parcelles, voire de leurs composants biologiques et matériels, et de les relier aux évolutions des entités territoriales, à méso- et macro-échelle, au jeu de leurs interactions dans de multiples réseaux, pour faire comprendre les enjeux et les possibilités de transformation (Franklin et al 2023). Les écueils à éviter pour alimenter des théories explicatives sont connus, mais il faut les rendre explicites pour apprendre à les contourner. Une position plus normative serait selon moi de mieux inscrire les théories de la géographie dans l'enseignement de la discipline, tout en restant prudent dans les solutions préconisées pour l'aménagement du territoire.

Références

- Achter, S., Borit, M., Cottineau, C., Meyer, M., Polhill, J. G., & Radchuk, V. (2024). How to conduct more systematic reviews of agent-based models and foster theory development-Taking stock and looking ahead. *Environmental Modelling & Software*, 173, 105867.
- Berque, A. (1994). *Cinq propositions pour une théorie du paysage*. Paris, Champ Vallon.
- Bettencourt, L., & West, G. (2010). A unified theory of urban living. *Nature*, 467(7318), 912-913.
- Bretagnolle A., Pumain D. 2010, Simulating urban networks through multiscalar space-time dynamics (Europe and United States, 17th -20th centuries), *Urban Studies*, 47, 13, 2819-2839.

Caruso, G., Pumain, D., & Thomas, I. (2023). No “Prêt à Porter” but a multi-scalar perspective of “Smart Cities”. In *Knowledge Management for Regional Policymaking* (pp. 123-147). Cham: Springer International Publishing.

Fang, C., Yang, J., Fang, J., Huang, X., & Zhou, Y. (2018). Optimization transmission theory and technical pathways that describe multiscale urban agglomeration spaces. *Chinese Geographical Science*, 28, 543-554.

Franklin, R. S., Delmelle, E. C., Andris, C., Cheng, T., Dodge, S., Franklin, J., Pumain, D..... & Wentz, E. A. (2023). Making space in geographical analysis. *Geographical Analysis*, 55(2), 325-341.

Lévy, J. (1978). Merci Monsieur Vidal. *Espaces Temps*, 8(1), 123-127.

Morhange, C., & Provansal, M. (2007). Géoarchéologie. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 13(1).

Mukumbang, F. C. (2023). Retroductive theorizing: a contribution of critical realism to mixed methods research. *Journal of Mixed Methods Research*, 17(1), 93-114.

Orain O. (2009). *De plain-pied dans le monde, écriture et réalisme dans la géographie française du XXe siècle*. Paris, L'Harmattan, Histoire des sciences humaines, 427 p.

Passeron, J. C. (1991). *Le raisonnement sociologique: un espace non poppérien de l'argumentation*. Paris, Nathan.

Pumain D. Robic M.-C. (2002). Le rôle des mathématiques dans une « révolution » théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970. *Revue d'histoire des sciences humaines*, 6, 123-144.

Pumain D. (ed.) (2020). *Theories and Models of Urbanisation*. Cham, Springer, Lecture Notes in Morphogenesis. ISBN: 978-3-030-36655-1

Reymond, H. (2009). L'intérêt géographique de la logique de S. Lupasco et de la théorie de la néoténie: proposition d'un crible transdisciplinaire pour l'étude de la résilience des géosystèmes urbains. *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Rimbert, S. (1972). Aperçu sur la géographie théorique: une philosophie, des méthodes, des techniques. *L'Espace géographique*, 101-106.

Sanders, L. (2011). Géographie quantitative et analyse spatiale: quelles formes de scientificités? in Martin T. (ed) *Les sciences humaines sont-elles des sciences?* Paris, Vuibert.

Schmitt, C., Rey-Coyrehourcq, S., Reuillon, R., & Pumain, D. (2015). Half a billion simulations: Evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42(2), 300-315.

Soja, E. W. (1989). *Postmodern Geographies. The Reassertion of Space in Critical Social Theory*. London, Verso Books, 266 p.

Staszak, J. F. (2001). La géographie, in J.M. Berthelot (dir) *Épistémologie des sciences sociales*. Paris, PUF, 77-116.