

Les réseaux des travaux de François Bavaud dans tous leurs états ou comment aborder François Bavaud dans le style de « Cantatrix Sopranica »

Céline Rozenblat & Mikhail Rogov

Université de Lausanne

{celine.rozenblat,mikhail.rogov}@unil.ch

Résumé

Cet article rend hommage à François Bavaud en retraçant les grandes lignes de son parcours scientifique, marqué par une approche interdisciplinaire alliant géographie quantitative, analyse textuelle, physique statistique et théorie de l'information. Inspirés de la méthode ludique de Perec, les auteurs explorent ses travaux à travers une analyse textuelle de ses publications, de leurs sources et de leurs citations, mettant en lumière des réseaux conceptuels complexes et originaux. Trois articles clés (Bavaud, 1991, 1998, 2011) servent de pivots à cette exploration : le premier sur la mécanique statistique, le second sur les matrices spatiales pondérées, et le dernier sur les transformations de Schoenberg. Chacun illustre la manière dont François Bavaud tisse des liens entre différentes disciplines et construit des ponts théoriques et méthodologiques. Son œuvre est saluée pour sa liberté intellectuelle, sa créativité mathématique et sa contribution à des domaines aussi variés que la physique, la géographie, l'écologie ou le machine learning. L'article souligne enfin l'héritage scientifique qu'il lègue à des communautés multiples, à travers une pensée rigoureuse, indépendante et profondément singulière.

Préambule

Tout le monde connaît François Bavaud, et pourtant qui le connaît vraiment ? Défenseur de la géographie quantitative (mais non inféodé), François Bavaud est tout autant friand d'analyses textuelles à la recherche du sens retrouvé des textes, films ou musiques. À cheval sur deux facultés, la Faculté des Géosciences et de l'environnement et la

Faculté des Lettres, il trace depuis de nombreuses années son chemin scientifique en statistiques spatiales et textuelles de manière libre et indépendante. « Libre », c'est un qualificatif qui, nous l'espérons, lui plaira, et qui nous semble bien correspondre à sa personnalité. Toutefois, on peut se demander s'il est scientifiquement si libre que cela. N'est-il pas finalement « coincé », « pris en étau », entre des paradigmes forts qu'il se doit de respecter, pour à son tour les léguer à une postérité qui s'en inspirera ? Et si oui, quels sont ces paradigmes, qu'en a-t-il fait et qu'en font ses héritiers ?

C'est ce que nous nous sommes demandé à ce moment précis où nous célébrons cette étape importante de sa vie professionnelle, en prenant au mot le terme « retraite » pour re-traiter ses productions scientifiques. Pour cela, nous avons considéré François Bavaud comme un objet d'étude que nous avons analysé à travers son corpus de publications, d'une manière dont on nous pardonnera la très modeste méthodologie au regard de la sophistication statistique de ses propres recherches. Néanmoins, nous nous sommes pris au jeu de l'exercice en appliquant une méthodologie que nous avons voulue rigoureuse et systématique.

Inspirée de « Cantatrix sopranica » (Georges [Perec](#), 1991)¹, sans prétendre nullement au génie chaotique de Perec, l'approche insistera sur les associations de termes, autant pour souligner la richesse qui apparaît dans les contributions scientifiques de François Bavaud, que pour interroger leur diversité, qui peut parfois paraître, elle aussi, chaotique au point de maximiser l'entropie du propre système théorique de l'auteur.

1 Approche et méthodologie biographique

Afin d'explorer le paysage conceptuel des travaux de François Bavaud, nous avons commencé par extraire un corpus de ses publications à partir de Google Scholar, soit 65 articles référencés. Nous avons considéré les résumés de ces articles afin d'en extraire le vocabulaire. Nous avons construit les cooccurrences des mots et la carte sémantique de

1 Dans cette perspective, une fausse référence se cache dans les nombreuses vraies références... et ce n'est pas Caussin qui est une vraie référence. Également pour rendre hommage au regretté Henri Chamussy, vous trouverez (ou non) trois contrepèteries au fil du texte.

ces réseaux. Chaque nœud du réseau correspond à un terme significatif, tandis que les arêtes illustrent la fréquence à laquelle les termes apparaissent dans les mêmes résumés. Emergent des grappes qui indiquent les associations des sujets dominants et l'organisation des modèles intellectuels. Cette méthode permet d'identifier les multiples contributions à différents domaines, leur diversité et leur cohérence.

Pour approfondir l'analyse de l'influence scientifique et du contexte intellectuel de François Bavaud, nous avons ensuite sélectionné trois de ses publications clés qui sont les plus citées jusqu'à présent (Bavaud, 1991, 1998, 2011) et nous avons construit deux corpus distincts pour chacune d'entre elles : l'un comprenant toutes les références incluses dans cette publication, et l'autre avec tous les articles qui citent la publication cible. Nous avons ainsi obtenu six corpus textuels, chaque paire de corpus associée à l'un des trois articles de François Bavaud représentant les dialogues scientifiques entrants et sortants. Dans les six graphes chronologiques en amont et en aval, les nœuds représentent les publications et les arêtes révèlent les relations de citation. Nous avons analysé et visualisé les champs conceptuels de ces corpus en cartographiant également à chaque fois la cooccurrence de leurs termes clés (six graphes également).

Cette approche va permettre une exploration comparative de la façon dont le travail de François Bavaud s'appuie sur des idées fondamentales et, d'un autre côté, comment il est reçu et interprété par des travaux ultérieurs. Cette double perspective permet de retracer visuellement la lignée savante de ses recherches, en cartographiant les auteurs et les idées sur lesquels il s'est appuyé, ainsi que la trajectoire de son influence à travers les auteurs qui se sont à leur tour servis de son travail. En plaçant les articles de François Bavaud au centre de chaque réseau, nous avons produit une vision temporelle de la manière dont ses recherches se situent dans le discours académique plus large, révélant les fondements intellectuels sur lesquels il s'est appuyé et les diverses manières dont ses contributions ont nourri des travaux ultérieurs.

Les réseaux sémantiques qui en résultent donnent un aperçu des passerelles entre le cadre conceptuel de Bavaud, les influences intellectuelles en amont et les communautés universitaires qui, en aval, se

sont appuyées sur son travail. La dynamique des citations de ces trois articles est toutefois à prendre avec prudence car, comme nous le verrons, ses travaux sont variés et articulent simultanément des champs différents, sans forcément qu'il y ait de succession préférentielle clairement identifiable dans le temps, sans qu'il en ait changé les maths. Dans un souci de cohérence dans cette dernière partie sur le corpus des articles qui citent François Bavaud, nous n'évoquerons pas les articles d'autocitation, bien qu'ils soient compris dans le corpus.

D'un point de vue technique, le travail sur tous ces corpus a commencé par une sélection des mots pour dégager les principaux termes qui peuvent donner du sens et éventuellement un regroupement des expressions similaires. Les cooccurrences des termes dans les mêmes articles ont permis de les positionner relativement les uns aux autres grâce au layout « Force Atlas ». Des clustering de graphes de « Louvain » (Blondel et al., 2008) ont attribué les termes dans des classes les plus cohérentes possibles (couleur) que nous avons tenté de nommer. Les citations et références des trois articles de Bavaud ont été collectées avec l'aide de l'outil Litmaps. Pour réaliser l'analyse textuelle et réaliser les graphes, nous nous sommes appuyés sur les logiciels libres Gargantext (Delanoë et al., 2023) et Gephi².

2 Les réseaux conceptuels de François Bavaud

Les concepts et méthodes clés développés dans les 65 publications de François Bavaud que nous avons analysées forment des paquets de champs conceptuels qu'il n'est pas aisé de qualifier clairement tant les concepts sont bien souvent combinés (Fig. 1).

Au centre du graphe, on trouve les formalismes fondamentaux dans les classes nommées ici **Classification properties** et **Matrix similarities**.

Matrix similarities regroupe des méthodes aussi diverses que les chaînes de Markov ou des indices de similarité ou de concentrations locales. Les Markov chains (reversible Markov transition matrices) permettent, par exemple dans le champ textuel, de quantifier des cooccurrences itérées pour construire des similarity indices entre mots ou

2 <https://gephi.org/> (consulté le 13 mai 2025).

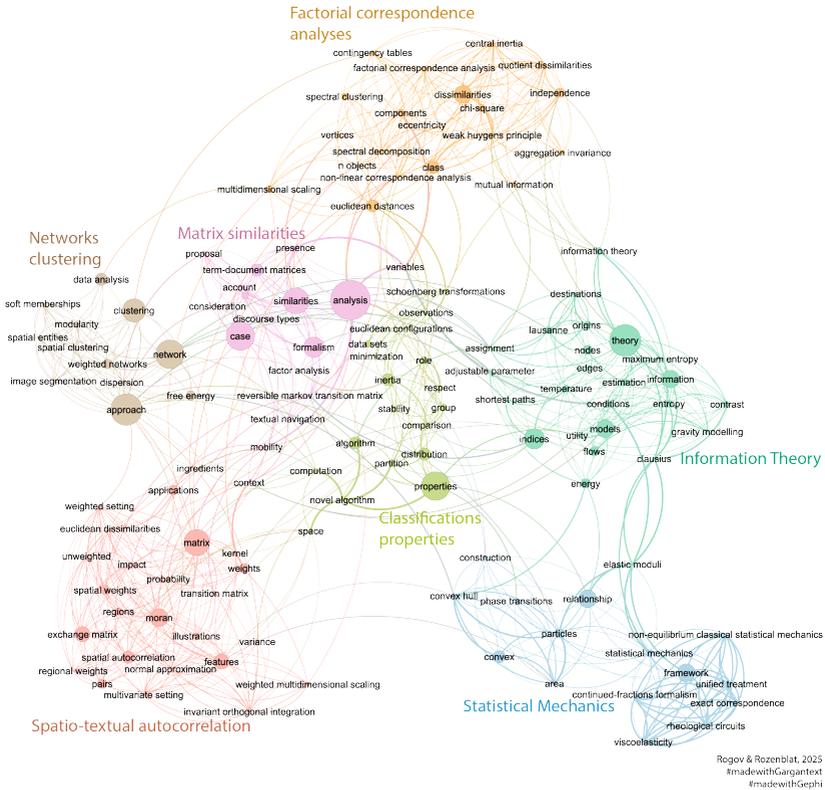


FIGURE 1 – Principaux concepts des articles de François Bavaud (1986-2024).

entre documents et de les classifier à différents ordres de cooccurrence (Bavaud & Xanthos, 2005). Les indices de similarité sont également appliqués aux matrices *terme-document* pour tenir compte des similarités sémantiques entre les termes, contribuant à réduire la variété du contenu dans des *correspondence analyses* (Egloff & Bavaud, 2018). Ces indices de similarité sont également utilisés pour comparer des *fuzzy classifications* (Bavaud, 2004) ou pour proposer un nouvel *indice de diversité*, basé sur l'*effective entropy* qui, selon l'auteur, réduit l'entropie de Shannon en tenant compte de la présence de similitudes entre les éléments (Bavaud, 2022).

Le groupe **Classification properties** est également assez central,

dans la mesure où il regroupe des termes généraux employés dans un grand nombre de ses articles : *observations*, *properties*, *algorithms*, *inertia* et *distributions* sont au cœur des réflexions sur le *partitionnement* où François Bavaud met en perspective la définition des distances euclidiennes sur les *graphes pondérés* et leurs *propriétés*. Cette réflexion est particulièrement développée dans trois publications entre 2010 et 2011 : partant des « Euclidean distances, soft and spectral clustering on weighted graphs » (Bavaud, 2010a), François Bavaud s'attache alors à approfondir les transformations de Schoenberg (Bavaud, 2010b, 2011). Grâce à ces transformations de Schoenberg (1938), il analyse les propriétés de nouvelles estimations de localisation qui transforment les distances euclidiennes initiales en nouvelles distances euclidiennes.

On reste dans des méthodes générales en glissant vers la classe de termes **Statistical mechanics** qui se réfère à des travaux précoces de la carrière de François Bavaud en Mécanique statistique portant sur les propriétés des formes convexes, les *elastic moduli* et la *viscoelasticity* pour la circulation des fluides (*rheology*) (Bavaud, 1987, 1989; Bavaud et al., 1986).

Ce qui permet d'intégrer la mécanique statistique aux problématiques actuelles se trouve autour des notions de *flow (origin-destination)*, d'*information theory*, d'*energy*, de *temperature*, de *thermodynamics* et d'*entropy*, qui sont des termes associés au groupe voisin que nous avons intitulé **Information theory**. Ce groupe de termes représente une partie théorique des travaux, où il unifie l'énergie, l'entropie et la théorie de l'information, les précise dans Zipf et Pareto, ce qui le conduit à tester l'effet de la variation de température et de « chauffer ou refroidir des textes » (Bavaud, 2009, p. 74; Bavaud & Xanthos, 2002, p. 4). Expliquant que finalement tout ceci repose sur la loi du moindre effort, le *gravity modelling* et les *shortest paths* sont étudiés dans le cadre de la *théorie de l'Information* qu'il semble préférer à toute autre.

L'origine des liens entre toutes ces théories, qu'il explique parfois à demi-mots dans ses articles, vient de la cristallographie dont sont issus d'autres collègues de renommée internationale dans la physique des réseaux (Havlin & Ben-Avraham, 1987). Ces racines de François Bavaud demeurent prégnantes dans ses travaux d'application qu'il a pu

faire tant en géographie qu'en analyses textuelles. C'est là un premier résultat majeur : François Bavaud se plaît à rapprocher conceptuellement les théories successives ou simultanées en associant allègrement différentes approches et à les faire dialoguer jusqu'à aujourd'hui.

C'est ainsi que toute cette base définit aussi son approche originale que l'on trouve dans les trois groupes de termes restants : **Factorial correspondence analyses**, **Network clustering** et **Spatio-temporal autocorrelation**. Ces trois groupes d'approches ont en effet en commun la théorie de l'information, les matrices de similarités et les propriétés des classifications, des partitions et plus fondamentalement la mécanique statistique. A ce stade, nous espérons avoir éclairé le-la lecteur-riche et ne pas l'avoir perdu-e.

3 Les sources de François Bavaud

C'est pourquoi nous proposons de remonter aux sources de cette œuvre. Ces sources, nous les avons puisées dans trois articles emblématiques de trois périodes de ses écrits : 1991, 1998, 2011.

3.1 Des sources initiales issues de « statistical mechanics »

Le premier article est :

Bavaud, F. (1991). Equilibrium properties of the Vlasov functional: the generalized Poisson-Boltzmann-Emden equation. *Reviews of Modern Physics*, 63(1):129–149.

Dans cet article, François Bavaud affirme

New results concerning the thermodynamic limit, phase transitions, metastability, and the shape of density profiles are provided. In particular, the question of ground states (in relationship to condensation and wetting phenomena) is illustrated by numerous explicit solutions (Bavaud, 1991, p. 129).

Il aborde des concepts aussi variés et originaux pour les néophytes que « superharmonicity », « degenerate ground state », « rotational invariance of density profiles » ou « truncation of higher-order correlations », soit un grand écart courageux de formulations de concepts basés sur une bibliographie comptant pas moins de 95 références (Fig. 2).

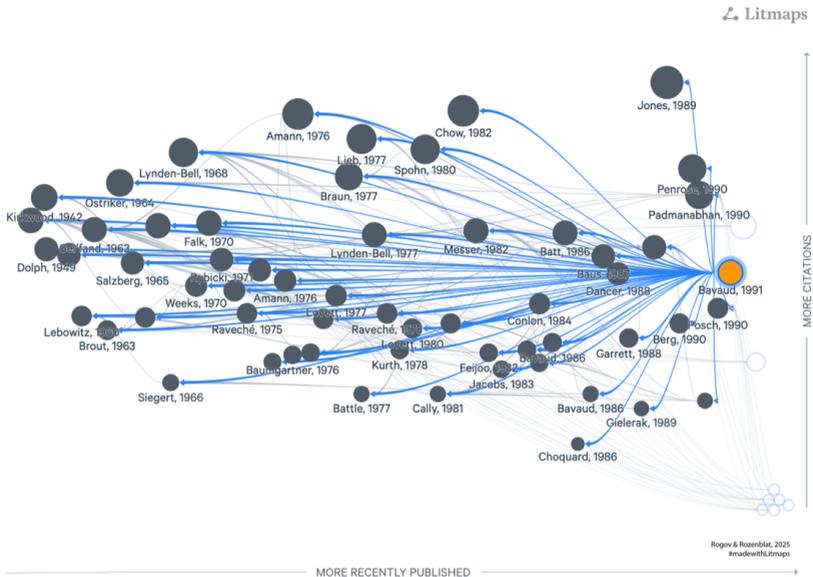


FIGURE 2 – Références bibliographiques de l'article Bavaud (1991).

Ces références couvrent un large champ de *Statistical mechanics* (Fig. 3). L'une traite de **Change of state** par *bifurcation* (Raveché & Stuart, 1976), par *freezing*, (Raveché & Kayser, 1978), avec la célèbre *first BBGKY equation* (pour les initiales de : Bogolioubov, Born, Green, Kirkwood et Yvon) ou par *fusion* (Kirkwood & Monroe, 1941). Ces systèmes concernent autant des *star systems* que des molécules (*fermions*, *bosons*) que l'on trouve dans les classes **Equations**, **Functions** et **Energy**. S'isolent les *Coulomb systems* (Conlon, 1984; Kennedy, 1984; Kiessling, 1990) (classe nommée **Statistical mechanics**) associés à *equilibrium thermodynamics*, *thermodynamic limits* ou *gravitational phase transitions* (Baumgartner, 1976).

3.2 Rencontre avec les statistiques spatiales

Le deuxième article que nous analysons est :

Bavaud, F. (1998). Models for spatial weights: a systematic look. *Geographical Analysis*, 30(2):153–171.

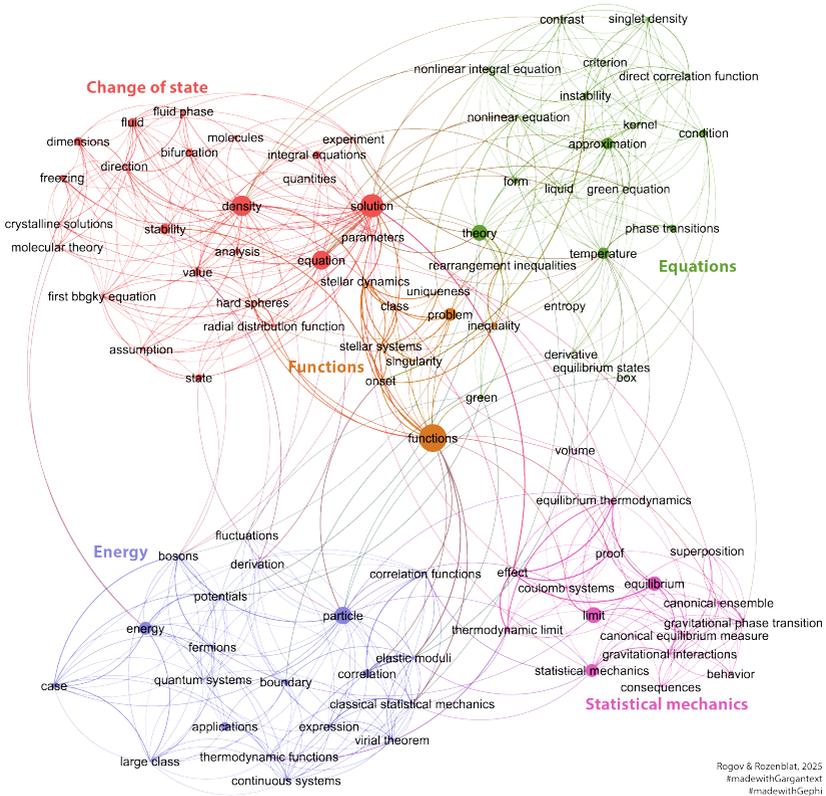


FIGURE 3 – Thématiques des références de l’article [Bavaud \(1991\)](#).

A la parution de cet article, François Bavaud vient de prendre son poste de professeur assistant de modélisation mathématique et de statistique à l’Université de Lausanne, car il est profondément persuadé que c’est un beau métier, professeur. Il revient d’un post-doc à l’Institute for Mathematical Behavioral Sciences – University of California – Irvine, où il a commencé l’écriture du manuscrit. Cette mobilité lui a permis de découvrir, s’appropriier et développer les statistiques spatiales. Il s’intéresse particulièrement à la distribution stationnaire associée aux poids spatiaux (l’indice de prééminence d’import ou d’export), aux classes structurelles d’interaction et aux propriétés d’invariance par inversion

temporelle ou par agrégation des matrices avec des poids spatiaux. Il les applique aux matrices de transition des chaînes de Markov, ce que l'on retrouve dans les modèles spatiaux, mais surtout il dit viser à combler une lacune de manque de géométrie intégrale dans ces approches. Il utilise neuf exemples, impliquant la connectivité, les flux et les modèles de décroissance de la distance, la géométrie intégrale et les tessellations de Dirichlet-Voronoi, pour illustrer la démonstration de ces principaux concepts.

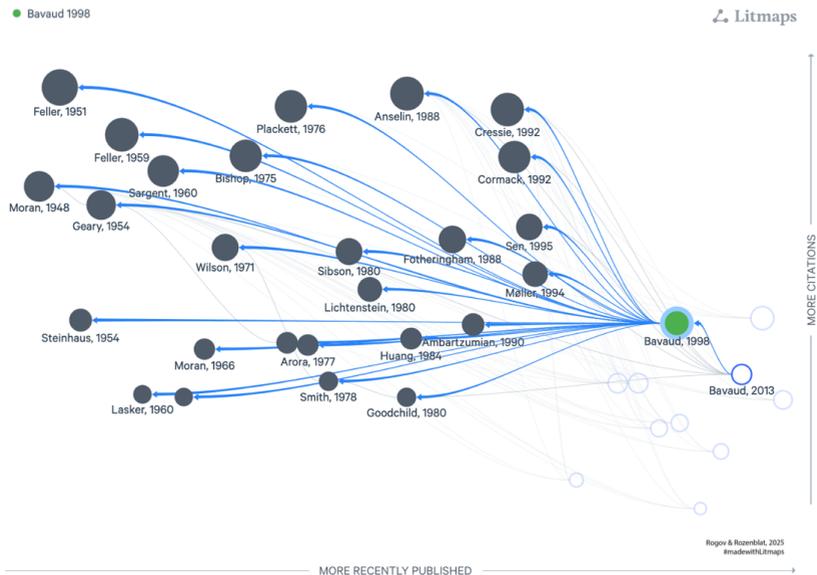


FIGURE 4 – Références bibliographiques de l'article Bavaud (1998).

Les 30 références bibliographiques sont cette fois fort différentes de celles de l'article de 1991 (Fig. 4). On y retrouve l'analyse spatiale avec Moran (1948, 1966) et Geary (1954), qui demeurent jusqu'à aujourd'hui parmi les auteurs majeurs de l'autocorrélation spatiale, mais aussi Wilson (1971) grand spécialiste des modèles gravitaires et de l'entropie en géographie. Puis des auteurs plus jeunes et aujourd'hui très reconnus dans la géographie théorique et quantitative comme Fotheringham & O'Kelly (1989), Goodchild & Smith (1980), Griffith & Anselin (1989),

3.3 Célébrer la tradition dans une perspective d'innovation

Le troisième article que nous analysons est :

Bavaud, F. (2011). On the Schoenberg transformations in data analysis: Theory and illustrations. *Journal of Classification*, 28:297–314.

Cet article de 2011 apparaît à la suite de plusieurs années de publications sur les propriétés spatiales (concentration géographique, flux) (Bavaud, 2008a,b) ou les propriétés textuelles (Bavaud & Xanthos, 2005; Bavaud et al., 2006). Bien entendu, les recherches méthodologiques restent très présentes dans la décennie 2000, portant essentiellement sur des comparaisons d'efficacité des méthodes et algorithmes comme l'analyse factorielle des correspondances, le « power kernel » associé aux Support Vector Machines (SVM) (Bavaud et al., 2006) ou sur l'établissement formel des classifications floues (Bavaud, 2004).

Entre 2010 et 2011, François Bavaud revient plusieurs fois sur les transformations de Schoenberg (1938). Dans cet article de 2011 en particulier, il se plaît à faire redécouvrir leurs propriétés qu'il compare aux kernels gaussiens utilisés en apprentissage automatique. Ainsi, évaluant l'efficacité de cette méthode traditionnelle de transformations de Schoenberg, basée sur les distances euclidiennes, à définir des covariances robustes, il démontre que cette approche est équivalente à celle des noyaux (kernels) et « sans doute plus intuitive » (p. 312).

Les références de cet article remontent pour six d'entre elles entre 1926 et 1941, puis six également entre 1960 et 1979, 22 entre 1980 et 1999, et 22 également de 2000 à 2010 (Fig. 6).

Les références de la première période 1926-1941 posent les bases conceptuelles historiques telles que : les fonctions monotones (Bernstein, 1929), l'intégration dans l'espace de Hilbert et les espaces métriques et fonctions définies positives (Schoenberg, 1938), les distances mutuelles (Young & Householder, 1938), les intégrales de Fourier (Neumann & Schoenberg, 1941).

La deuxième période 1960-1979 se réfère au *scaling* (Torgerson, 1961), aux propriétés de distance des racines latentes des méthodes vectorielles utilisées dans l'analyse multivariée (Gower, 1966) ou aux

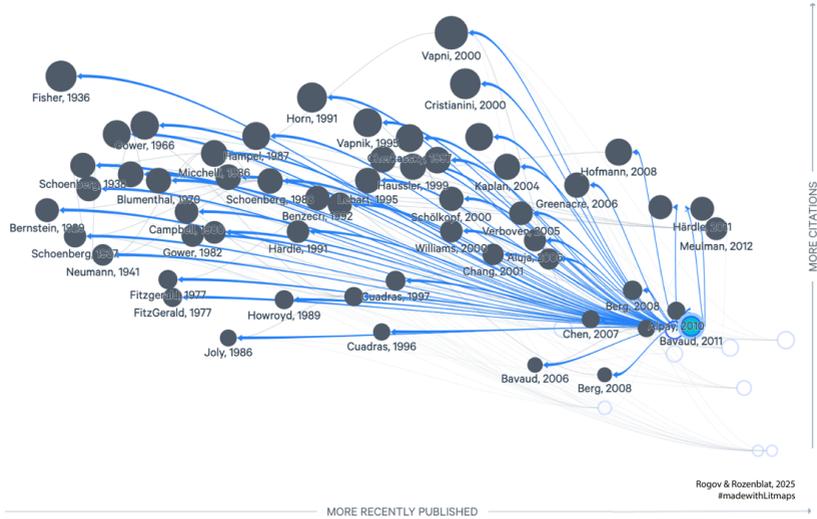


FIGURE 6 – Références bibliographiques de l'article Bavaud (2011).

puissances fractionnaires de Hadamard des matrices définies positives (Fitzgerald & Horn, 1977).

Les années 1980 et 1990 apportent les variogrammes (Christakos, 1984), des avancées sur les analyses des correspondances (Benzecri, 1992) et les puissances fractionnaires de Hadamard des matrices définies positives (Howroyd et al., 1989). Les années 1990 enrichissent également le scaling pondéré et multivarié (Borg & Groenen, 1996; Cuadras & Fortiana, 1996), l'interpolation des données spatiales et le « krigage » (Stein, 1999) ou les noyaux de convolution (Hausman, 1999).

Quant aux années 2000, elles consolident les méthodes kernel dans les apprentissages automatiques (Hofmann et al., 2008) et apportent des sophistications dans les méthodes multivariées et de clustering (Bavaud, 2009).

Les termes lexicaux utilisés par toutes ces références soulignent six champs différents qui ne suivent pas d'ordre chronologique, mais plutôt

montrent des travaux anciens et récents qu'il combine dans chacun des domaines (Fig. 7).

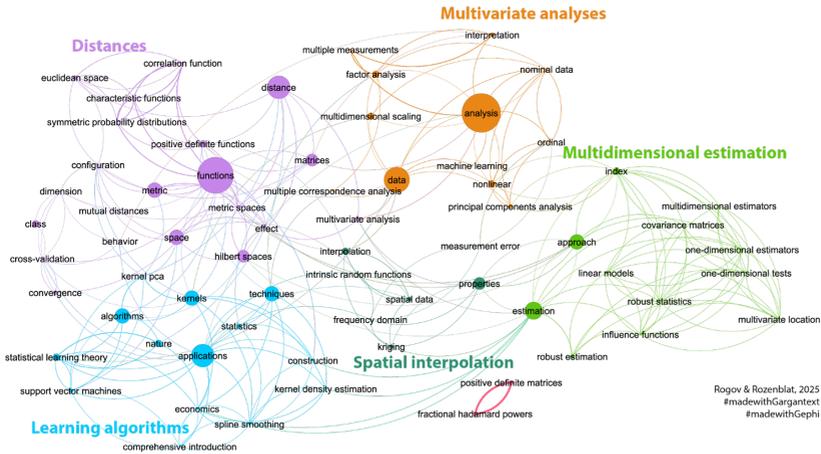


FIGURE 7 – Thématiques des références de l'article [Bavaud \(2011\)](#).

Les **Multivariate analyses** incluent l'analyse des correspondances multiples sur des données nominales ou ordinales et l'analyse en composantes principales et elles sont associées à l'apprentissage automatique (machine learning). La classe **Multidimensional estimations** associe les tests uni-dimensionnels ou multi-dimensionnels aux matrices de covariance. La classe **Distances** concerne les fonctions de distance et métriques spatiales tandis que la classe **Spatial interpolation** regroupe les méthodes d'interpolation et de kriging. La classe **Learning algorithms** identifie les applications d'algorithmes de noyaux (kernels) et les théories d'apprentissage statistiques.

Au total, l'article de 2011 de François Bavaud démontre l'ampleur de sa base théorique et méthodologique qui construit une certaine cohérence d'un panel de références fondatrices de différents domaines autant que de leurs avancées plus récentes. Il confirme la profondeur de sa réflexion qui se nourrit continuellement de chaque domaine en parallèle pour produire son cocktail original qui les combine.

4 Des champs scientifiques inspirés par les travaux de François Bavaud

Ainsi, l’originalité des travaux de François Bavaud tient dans la subtile combinaison de multiples champs scientifiques et nous pouvons faire l’hypothèse qu’à leur tour ils inspirent des champs scientifiques eux-mêmes variés. L’exploration des travaux citant les trois articles que nous avons précédemment étudiés va partiellement nous éclairer sur l’ampleur des champs scientifiques touchés et la nature de leurs impacts.

4.1 Une pierre dans l’édifice des modèles thermodynamiques

L’article de 1991 est cité 92 fois de manière très régulière jusqu’à aujourd’hui (Fig. 8).

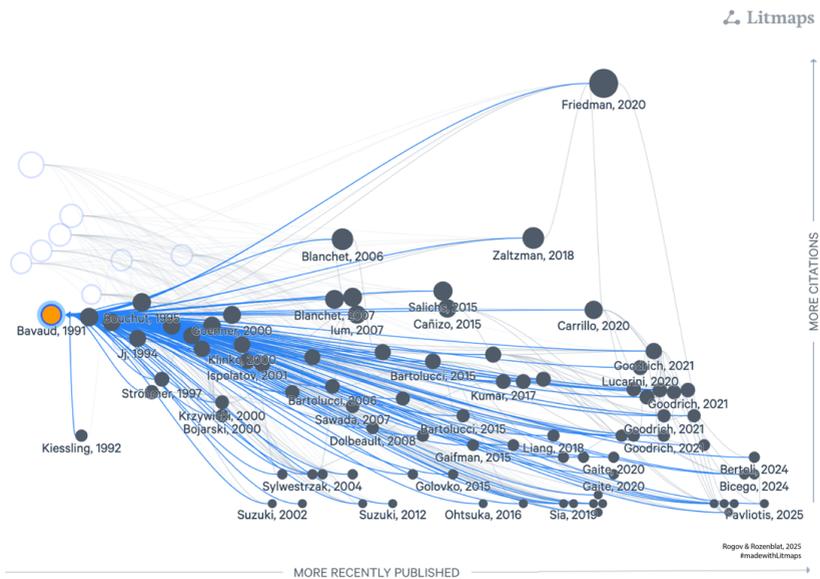


FIGURE 8 – Travaux citant l’article de Bavaud (1991).

Le domaine de la physique caractérise l’ensemble de ces articles (Fig.9) et en particulier la **Thermodynamics** qui concerne 31 articles dont ceux parmi les plus récents autour des transitions de phase, des énergies des systèmes dynamiques de particules, etc. (i.e. Bertoli et al.,

(Cui & Friedman, 2003). On trouve également des citations dans des domaines se focalisant sur des modèles spécifiques comme les **Onsager description of 2D turbulence** (Bartolucci & De Marchis, 2015; Bartolucci et al., 2018; Suzuki, 2012), **Savage framework and models of human decision** (Gaifman & Liu, 2015) qui associent également des systèmes auto-gravitants (Aly, 1994) que l'on retrouvera toutefois plus nombreux dans la classe **Boundary conditions** (par ex. Biler & Nadzieja, 1993; Soler et al., 1997). Un autre groupe de termes concerne les **Fractals & scales** en cosmologie notamment (Gaite, 2020; Miller et al., 2023). La classe **Long time** contient des termes insistant sur la dimension temporelle des modèles d'équation interagissant fortement avec les autres classes de termes (Blanchet et al., 2006, 2008; Bouchut & Dolbeault, 1995; Dolbeault, 1999; Toshpulatov, 2023). La classe **Global bifurcation diagram** ne partage aucun terme avec les autres classes bien que l'unique article formant cette classe (Bartolucci & Jevnikar, 2021) soit écrit par des co-auteurs que l'on retrouve dans les autres classes avec d'autres articles. Dans cet article de 2021, ils analysent le « comportement qualitatif du diagramme de bifurcation global de la branche non bornée des solutions du problème de Gelfand traversant l'origine (Gelfand, 1963, p. 1) » (traduction des auteurs) tout en utilisant la dynamique des particules en interaction avec elles-mêmes, qu'ils ont puisée dans l'article de François Bavaud de 1991. Car nul n'est jamais assez fort pour ce calcul.

4.2 Un pilier pour les approches spatio-temporelles des interactions

En se consacrant à l'approfondissement des propriétés des matrices pondérées, l'article de François Bavaud de 1998 est cité 229 fois et s'ouvre cette fois à des disciplines bien plus variées (Fig. 10). L'article est toujours cité par quelques physiciens, mais qui deviennent très minoritaires au profit des statisticiens, des géographes, des études de transport, des sciences régionales, des économistes, ou encore des sociologues.

Un grand point commun de toutes ces disciplines est la question des simulations spatiales à partir de données spatio-temporelles d'interaction avec la classe centrale **Spatial simulations** (Fig. 11). Cette

classe est formée par 57 articles insistant sur les *weighted matrices*, avec 10 textes traitant des *relationships*, 4 des *spatial interdependencies*, 3 des *spillovers*, et 13 des *distributions*. On trouve aussi des termes courants très fréquents dans les modélisations tels que *effets* (concerne 14 documents) et *impact* (16 documents).

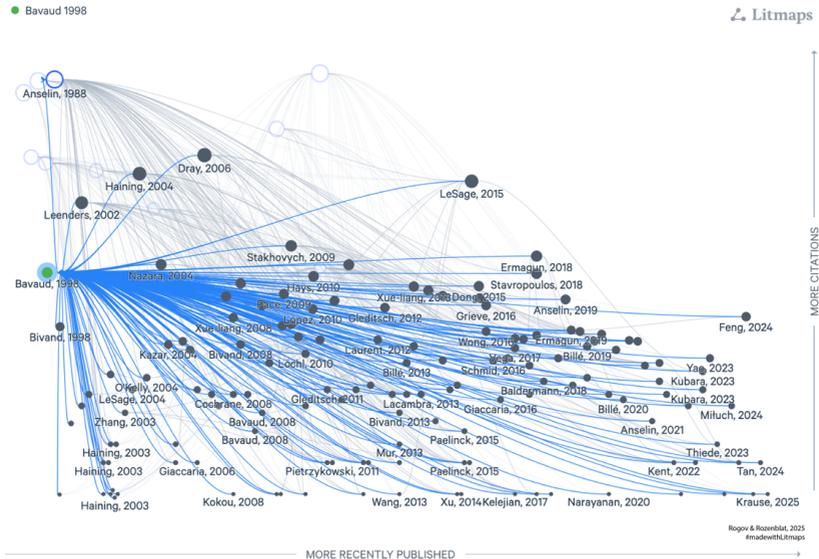


FIGURE 10 – Travaux citant l'article de Bavaud (1998).

Autour de ce groupe central « général », on trouve des thématiques plus spécialisées. Les articles contribuant au groupe des **Spatial autoregressive models** sont essentiellement publiés dans la revue *Geographical Analysis* (Dong & Harris, 2015; Ermagun & Levinson, 2018), *Papers in Regional Science* (Stakhovych & Bijmolt, 2009; Zhou & Lai, 2011) ou d'autres revues ou ouvrages de modélisation économique (Anselin, 2021; Krause & Kripfganz, 2025; Leenders, 2002; Scrucca, 2005). Un autre groupe de **Spatial econometric models**, n'est constitué que d'un article (Billé & Arbia, 2019) dédié à l'économie de la santé qui fait une revue des modèles à variables spatiales.

Le groupe **Networks & weighted matrices** rassemble des articles méthodologiques sur l'utilisation des mesures de centralité et des modèles

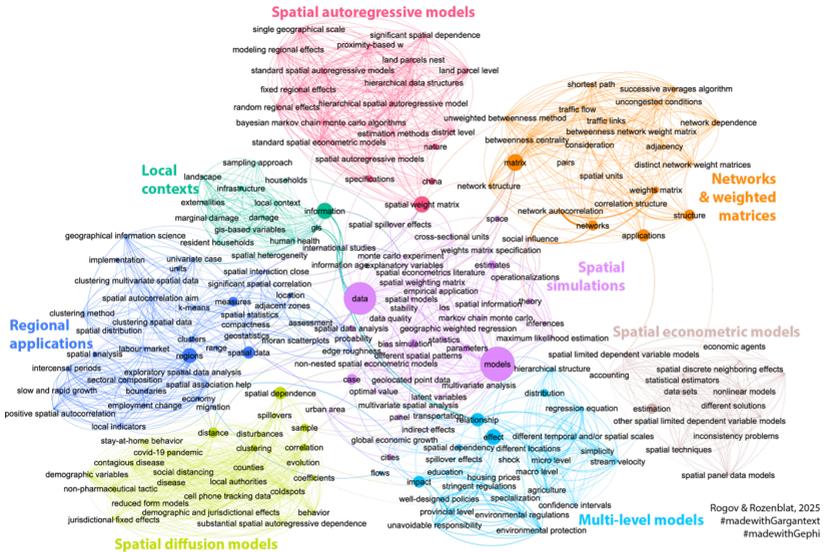


FIGURE 11 – Thématiques des travaux citant l’article de Bavaud (1998).

bayésiens sur les réseaux ou d’autocorrélation en physique, en économie ou en géographie (Dray, 2011; Ermagun & Levinson, 2018; Pace & LeSage, 2009; Stakhovych, 2010; Zhang, 2003; Zhang & Murayama, 2003). Contribuent également à cette classe des articles d’applications en économie (Billé & Catania, 2018), en géographie (Ermagun & Levinson, 2019; Zhu & Diao, 2020) ou en économie politique (Herrera Gómez et al., 2011). Le groupe **Spatial autoregressive models** réunit des termes des articles précédemment cités, mais particulièrement focalisés sur les algorithmes de modélisation et les méthodes d’estimation. Le groupe **Multi-level models** est constitué de deux articles d’écologie écrits par le même couple d’auteurs (Berk & de Leeuw, 2006; de Leeuw & Berk, 2003).

Les groupes **Regional applications** et **Spatial diffusion models** concernent davantage des statistiques appliquées dans les sciences sociales. Le premier groupe **Regional applications** réunit des clusterings dans les domaines du *marché du travail* (Baxendine et al., 2005; Scrucca, 2005), des relations entre la *migration* et la *convergence* internationale

(Østbye & Westerlund, 2007), du *shift & share* sur l'emploi (Cochrane & Poot, 2008), des études de proximité en écologie (Nelson & Robertson, 2012) ou propose une application *R* pour la modélisation des *données aréales* (Bivand et al., 2013). Le groupe **Spatial diffusion models** est formé par deux articles des mêmes auteurs sur les *déterminants démographiques, juridictionnels ou spatiaux* dans la *distance sociale* durant l'épidémie du *COVID-19* (Narayanan et al., 2020). Le groupe **Local contexts** concerne deux articles d'autres auteurs qui estiment les *effets décroissants de la distance* dans des contextes socio-économiques variables sur la *perception* des habitants de certaines *infrastructures énergétiques* (Giaccaria et al., 2010, 2016).

Au total, on remarque ici une grande diversité d'approches qui s'inspirent de cet article de François Bavaud de 1998 pour en tirer différents aspects : les graphes pondérés, les autocorrélations spatiales, les clustering multivariés de variables spatiales, les modèles de distance, la modélisation dynamique et multi-échelle. Cela révèle la richesse multidimensionnelle de cet article et explique son grand nombre de citations.

4.3 Un pont entre les anciennes théories et les data sciences

L'article de François Bavaud de 2011 est cité 24 fois (Fig. 12). Bien que moins cité que les deux autres articles, cet article opère un retour synthétique aux fondamentaux de la physique théorique et à leurs liens qu'il explicite dans les approches plus contemporaines. Les thématiques des articles qui le citent sont clairement articulées et les citations se réfèrent souvent à ces combinaisons de thématiques (Fig. 13).

A l'image de cet article de François Bavaud, plusieurs des documents le citant opèrent des ponts entre les différents champs conceptuels de la physique, des statistiques et de l'informatique, notamment perceptibles dans les termes généraux situés au milieu du graphe qui concernent un mélange entre **Computation and Mathematics** auquel se réfèrent des manuels (Yao, 2019), des ouvrages sur le risk management (Dionne & Koumou, 2018) ou sur l'étude de la perception de dieu par les enfants (Cocco & Ceré, 2023). Tous ces documents ont en commun d'articuler les différents champs et de les relier aux champs actuels des data sciences.

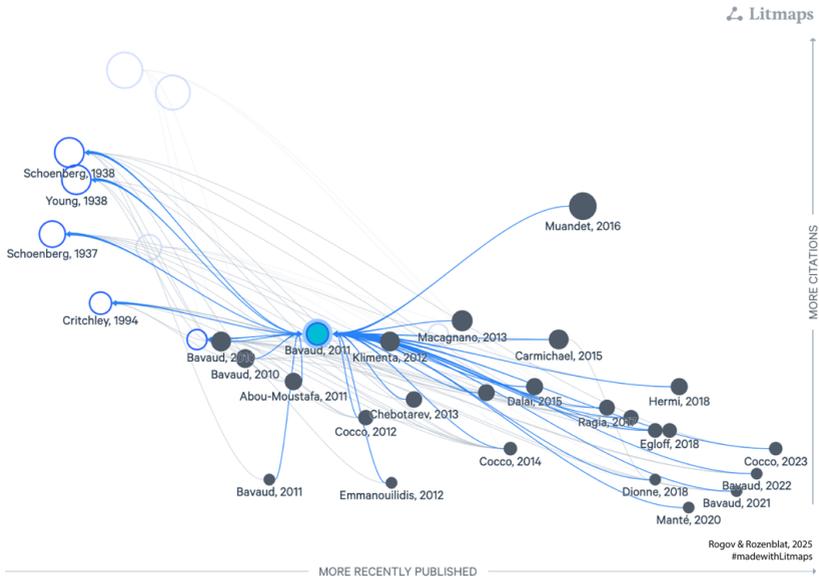


FIGURE 12 – Travaux citant l’article de Bavaud (2011).

L’article est cité spécifiquement sur les **Euclidian distances and clustering** se référant directement aux *Schoenberg transformations* (Al-fakih, 2018), ou au *spectral clustering* (Abou-Moustafa et al., 2011). Les termes *similarities*, *entropy* et *multidimensional scaling* se retrouvent associés (Cocco, 2014; Macagnano & De Abreu, 2013) pour former le groupe **Similarities and entropy**. Des auteurs comme Muandet et al. (2017), revisitant les *kernels* dans le cadre du *machine learning*, contribuent au voisinage intime entre les groupes **Kernel and metrics of space** et **Unsupervised learning**.

Au total, cet article de « retour aux sources » semble boucler une boucle non définitive en reliant d’anciennes théories dans le cadre des approches contemporaines d’apprentissage : il s’agit de mettre à l’épreuve autant les théories précédentes que les nouvelles en confrontant leurs propriétés fondamentales. De ce point de vue, cet article est une étape importante constituant un pont robuste entre des paradigmes reposant fondamentalement tous sur des lois de probabilité

trois articles pris comme exemples sont encore abondamment cités aujourd'hui et le seront certainement encore dans le futur.

- Des ponts entre ces théories et les approches des distances et des dissimilarités à partir de graphes valués telles que développées en géographie, en analyse textuelle mais également en économie, en écologie, en science politique ou en sociologie.

Au-delà des ponts, les mélanges opérés par François Bavaud constituent une recherche intrinsèque des formules tant mathématiques qu'épistémologiques et verbales, à l'image de son sous-titre dans l'article de 1991, de « textes réchauffés et refroidis » (Bavaud, 2009, p. 74; Bavaud & Xanthos, 2002, p. 4). Derrière ce type de titres, on aperçoit un jeu libre des formules, des mots et des concepts en perpétuelle redéfinition et questionnements profonds sur les mécanismes sous-jacents de la pensée et du classement : penser avant de classer ou classer avant de penser (Perec, 2003) ? C'est un peu comme dans le *Traité du zen et de l'entretien des motocyclettes* (Pirsig, 1974) où l'auteur erre à la recherche d'une certaine beauté comprise tant dans le sens que dans la forme. Cette recherche active sans fin de la beauté des formules que François Bavaud nous donne à voir représente plus qu'une carrière : c'est un parcours de vie profitant pleinement de la « liberté académique » qui lui est donnée, que nous avons eu l'extrême chance de côtoyer et de partager, et pour cela nous l'en remercions profondément.

Références

- Abou-Moustafa, K., Shah, M., De La Torre, F., & Ferrie, F. (2011). Relaxed exponential kernels for unsupervised learning. In *Joint Pattern Recognition Symposium*, pages 184–195, Berlin, Heidelberg. Springer.
- Alfakih, A. Y. (2018). *Euclidean distance matrices and their applications in rigidity theory*. Springer, Cham.
- Aly, J. J. (1994). Thermodynamics of a two-dimensional self-gravitating system. *Physical Review E*, 49(5):3771.
- Ambartzumian, R. V. (1990). *Factorization calculus and geometric probability*. Cambridge University Press, 1ère édition.
- Anselin, L. (2021). *Spatial models in econometric research*. Oxford University Press, Oxford.

- Arora, S. S. & Brown, M. (1977). Alternative approaches to spatial autocorrelation: an improvement over current practice. *International Regional Science Review*, 2(1):67–78.
- Bartolucci, D. & De Marchis, F. (2015). Supercritical mean field equations on convex domains and the Onsager’s statistical description of two-dimensional turbulence. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 217:525–570.
- Bartolucci, D. & Jevnikar, A. (2021). On the global bifurcation diagram of the gelfand problem. *Analysis & PDE*, 14(8):2409–2426.
- Bartolucci, D., Jevnikar, A., Lee, Y., & Yang, W. (2018). Non-degeneracy, mean field equations and the Onsager theory of 2D turbulence. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 230:397–426.
- Baumgartner, B. (1976). Thermodynamic limit of correlation functions in a system of gravitating fermions. *Communications in Mathematical Physics*, 48(3).
- Bavaud, F. (1987). Statistical mechanics of viscoelasticity. *Journal of Statistical Physics*, 46(3/4):753–775.
- Bavaud, F. (1989). Statistical mechanics of convex bodies. *Journal of Statistical Physics*, 57:1059–1068.
- Bavaud, F. (1991). Equilibrium properties of the Vlasov functional: the generalized Poisson-Boltzmann-Emden equation. *Reviews of Modern Physics*, 63(1):129–149.
- Bavaud, F. (1998). Models for spatial weights: a systematic look. *Geographical Analysis*, 30(2):153–171.
- Bavaud, F. (2004). On the comparison and representation of fuzzy partitions. [Notes de cours non publiées]. Université de Lausanne.
- Bavaud, F. (2008a). The endogenous analysis of flows, with applications to migrations, social mobility and opinion shifts. *Journal of Mathematical Sociology*, 32:239–266.
- Bavaud, F. (2008b). Local concentrations. *Papers in Regional Science*, 87(3):357–371.
- Bavaud, F. (2009). Aggregation invariance in general clustering approaches. *Advances in Data Analysis and Classification*, 3:205–225.
- Bavaud, F. (2010a). Euclidean distances, soft and spectral clustering on weighted graphs. In *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: European Conference, ECML PKDD 2010, Barcelona, Spain, September 20-24, 2010, Proceedings, Part I 21*, pages 103–118. Springer Berlin Heidelberg.
- Bavaud, F. (2010b). Les transformations de Schoenberg : propriétés et applications en analyse des données. In *Journées de statistique*, volume 42, Marseille.

- Bavaud, F. (2011). On the schoenberg transformations in data analysis: Theory and illustrations. *Journal of Classification*, 28:297–314.
- Bavaud, F. (2022). Similarity-reduced diversities: The effective entropy and the reduced entropy. *Journal of Classification*, 39(1):100–121.
- Bavaud, F., Choquard, P., & Fontaine, J. R. (1986). Statistical mechanics of elastic moduli. *Journal of Statistical Physics*, 42:621–646.
- Bavaud, F., Picca, D., & Curdy, B. (2006). Non-linear correspondence analysis in text retrieval: a kernel view. In *Proceedings of JADT, 8èmes Journées internationales d'Analyse statistique des Données Textuelles*, pages 741–747.
- Bavaud, F. & Xanthos, A. (2002). Thermodynamique et statistique textuelle: concepts et illustrations. In *Proceedings of JADT, 6èmes journées internationales d'analyse statistique des données textuelles*, pages 101–111.
- Bavaud, F. & Xanthos, A. (2005). Markov associativities. *Journal of Quantitative Linguistics*, 12(2-3):123–137.
- Baxendine, S., Cochrane, W., & Poot, J. (2005). Description and spatial analysis of employment change in new zealand regions 1986-2001. Technical report, University of Waikato, Population Studies Centre.
- Benzecri (1992). *Correspondence analysis handbook*. Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
- Berk, R. A. & de Leeuw, J. (2006). Multilevel statistical models and ecological scaling. In Wu, J., Jones, K. B., Li, H., & Loucks, O. L. (éd.), *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology*, pages 67–88. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Bernstein, S. (1929). Sur les fonctions absolument monotones. *Acta Mathematica*, 52(1):1–66.
- Bertoli, B., Goddard, B. D., & Pavliotis, G. A. (2025). Stability of stationary states for mean field models with multichromatic interaction potentials. *IMA Journal of Applied Mathematics*, page hxaf001.
- Biler, P. & Nadzieja, T. (1993). Existence and nonexistence of solutions for a model of gravitational interaction of particles, i. *Colloquium Mathematicae*, 66(2):319–334.
- Billé, A. G. & Arbia, G. (2019). Spatial limited dependent variable models: A review focused on specification, estimation, and health economics applications. *Journal of Economic Surveys*, 33(5):1531–1554.
- Billé, A. G. & Catania, L. (2018). Dynamic spatial autoregressive models with time-varying spatial weighting matrices. Technical Report BEMPS55, Faculty of Economics and Management at the Free University of Bozen.
- Bishop, Y. M. M., Fienberg, S. E., Holland, P. W., Light, R. J., & Mosteller, F. (1975). *Discrete multivariate analysis: Theory and practice*. The MIT Press, Cambridge, MA.

- Bivand, R. S., Pebesma, E., & Gómez-Rubio, V. (2013). *Modelling areal data*, pages 263–318. Springer, New York, NY.
- Blanchet, A., Carrillo, J. A., & Masmoudi, N. (2008). Infinite time aggregation for the critical Patlak-Keller-Segel model in R^2 . *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 61(10):1449–1481.
- Blanchet, A., Dolbeault, J., & Perthame, B. (2006). Two-dimensional Keller-Segel model: Optimal critical mass and qualitative properties of the solutions. *Electronic Journal of Differential Equations (EJDE)*, (44):33.
- Blondel, V. D., Guillaume, J. L., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, page P10008.
- Borg, I. & Groenen, P. J. F. (1996). *Modern multidimensional scaling*. Springer, New York, NY.
- Bouchut, F. & Dolbeault, J. (1995). On long time asymptotics of the Vlasov-Fokker-Planck equation and of the Vlasov-Poisson-Fokker-Planck system with Coulombic and Newtonian potentials. *Differential and Integral Equations*, 8:587–514.
- Caussinus, H. (1965). Contribution à l'analyse statistique des tableaux de corrélation. *Annales de la Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse*, 29:77–182.
- Christakos, G. (1984). On the problem of permissible covariance and variogram models. *Water Resources Research*, 20(2):251–265.
- Cocco, C. (2014). *Typologies textuelles et partitions musicales: dissimilarités, classification et autocorrélation*. Thèse de doctorat, Université de Lausanne.
- Cocco, C. & Ceré, R. (2023). Computer vision and mathematical methods used to analyse children's drawings of God(s). In *When Children Draw Gods: A Multicultural and Interdisciplinary Approach to Children's Representations of Supernatural Agents*, pages 213–244. Springer International Publishing, Cham.
- Cochrane, W. & Poot, J. (2008). Forces of change: A dynamic shift-share and spatial analysis of employment change in New Zealand labour markets areas. *Studies in Regional Science*, 38(1):51–78.
- Conlon, J. G. (1984). The ground state energy of a classical gas. *Communications in Mathematical Physics*, 94:439–458.
- Cuadras, C. M. & Fortiana, J. (1996). Weighted continuous metric scaling. In Gupta, A. K. & Girko, V. L. (éd.), *Multidimensional Statistical Analysis and Theory of Random Matrices. Proceedings of the Sixth Eugene Lukacs Symposium, Bowling Green, Ohio, USA, 29–30 March 1996*, pages 27–40. De Gruyter, Berlin, Boston.

- Cui, S. & Friedman, A. (2003). A free boundary problem for a singular system of differential equations: An application to a model of tumor growth. *Transactions of the American Mathematical Society*, 355(9):3537–3590.
- Delanoë, A., Chavalarias, D., & Lobbé, Q. (2023). Gargantext: collaborative and decentralized libreware, version 0.0.7. Source Code.
- Dionne, G. & Koumou, G. (2018). Machine learning and risk management: Svdd meets rqe. Technical Report 18-6.
- Dolbeault, J. (1999). Free energy and solutions of the Vlasov-Poisson-Fokker-Planck system: external potential and confinement (large time behavior and steady states). *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 78(2):121–157.
- Dong, G. & Harris, R. (2015). Spatial autoregressive models for geographically hierarchical data structures. *Geographical Analysis*, 47(2):173–191.
- Dray, S. (2011). A new perspective about Moran’s coefficient: spatial autocorrelation as a linear regression problem. *Geographical Analysis*, 43(2):127–141.
- Egloff, M. & Bavaud, F. (2018). Taking into account semantic similarities in correspondence analysis. In *Proceedings of the Workshop on Computational Methods in the Humanities 2018 (COMHUM 2018)*, volume 2314 of *CEUR Workshop Proceedings*, pages 45–51.
- Ermagun, A. & Levinson, D. (2018). An introduction to the network weight matrix. *Geographical Analysis*, 50(1):76–96.
- Ermagun, A. & Levinson, D. M. (2019). Development and application of the network weight matrix to predict traffic flow for congested and uncongested conditions. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(9):1684–1705.
- Fitzgerald, C. H. & Horn, R. A. (1977). On fractional Hadamard powers of positive definite matrices. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 61(3):633–642.
- Fotheringham, A. S. & O’Kelly, M. E. (1989). *Spatial interaction models: formulations and applications*, volume 1. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Gaifman, H. & Liu, Y. (2015). Context-dependent utilities: A solution to the problem of constant acts in Savage. In *Logic, Rationality, and Interaction: 5th International Workshop, LORI 2015, Taipei, Taiwan, October 28-30, 2015. Proceedings 5*, pages 90–101. Springer Berlin Heidelberg.
- Gaite, J. (2020). Scale symmetry in the universe. *Symmetry*, 12(4):597.
- Geary, R. C. (1954). The contiguity ratio and statistical mapping. *The Incorporated Statistician*, 5(3):115–146.

- Gelfand, I. M. (1963). Some problems in the theory of quasi-linear equations. *American Mathematical Society Translations*, 29(2):295–381.
- Giaccaria, S., Frontuto, V., & Dalmazzone, S. (2010). Who's afraid of power lines? merging survey and gis data to account for spatial heterogeneity. Technical Report 2, Department of Economics, "S. Cognetti de Martiis", Università di Torino.
- Giaccaria, S., Frontuto, V., & Dalmazzone, S. (2016). Valuing externalities from energy infrastructures through stated preferences: a geographically stratified sampling approach. *Applied Economics*, 48(56):5497–5512.
- Goodchild, M. F. & Smith, T. R. (1980). Intransitivity the spatial interaction model and US migration streams. *Environment and Planning A*, 12(10).
- Goodrich, C. S. (2021). A topological approach to nonlocal elliptic partial differential equations on an annulus. *Mathematische Nachrichten*, 294(2):286–309.
- Gower, J. (1966). Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis. *Biometrika*, 53(3-4):325–338.
- Griffith, D. A. & Anselin, L. (1989). Spatial econometrics: methods and models. *Economic Geography*, 65(2):160.
- Haberman, S. J. (1976). Review of the book : Discrete multivariate analysis: Theory and practice. *The Annals of Statistics*, pages 817–820.
- Hastings, A. & Gross, L. J. (2012). *Encyclopedia of theoretical ecology*. Number 4. University of California Press, Berkeley.
- Haussler, D. (1999). Convolution kernels on discrete structures. <http://ci.nii.ac.jp/naid/10015408231/>.
- Havlin, S. & Ben-Avraham, D. (1987). Diffusion in disordered media. *Advances in Physics*, 36(6):695–798.
- Herrera Gómez, M., Mur Lacambra, J., & Ruiz Marín, M. (2011). Which spatial weighting matrix? An approach for model selection. *Asociación Argentina de Economía Política, Mar del Plata*.
- Hofmann, T., Schölkopf, B., & Smola, A. J. (2008). Kernel methods in machine learning. *Annals of Statistics*, 36(3):1171–1220.
- Hordijk, L. & Nijkamp, P. (1977). Dynamic models of spatial autocorrelation. *Environment and Planning A*, 9(5):505–519.
- Howroyd, T. D., Upton, C. J. F., & Wood, W. W. (1989). Fractional Hadamard powers of positive definite matrices. *Real Analysis Exchange*, 15(1):21–25.
- Kennedy, T. (1984). Mean field theory for Coulomb systems. *Journal of Statistical Physics*, 37:529–559.
- Kiessling, M. K. (1990). A complementary thermodynamic limit for classical Coulomb matter. *Journal of Statistical Physics*, 59(5-6):1157–1186.

- Kiessling, M. K. (1992). Finite-volume statistical mechanics of two-component Coulomb-like systems and the principle of macroscopic equivalence. *Communications in Mathematical Physics*, 146:311–331.
- Kirkwood, J. G. & Monroe, E. (1941). Statistical mechanics of fusion. *The Journal of Chemical Physics*, 9(7):514–526.
- Krause, M. & Kripfganz, S. (2025). Regional dependencies and local spillovers: Insights from commuter flows. *Journal of Regional Science*.
- Leenders, R. T. A. (2002). The specification of weight structures in network autocorrelation models of social influence. Technical Report 02B09, University of Groningen, Research Institute SOM (Systems, Organisations and Management).
- de Leeuw, J. & Berk, R. (2003). Final report to the EPA on multilevel models for generalization. Technical report.
- Lucarini, V., Pavliotis, G. A., & Zagli, N. (2020). Response theory and phase transitions for the thermodynamic limit of interacting identical systems. *Proceedings of the Royal Society A*, 476(2244):20200688.
- Macagnano, D. & De Abreu, G. T. F. (2013). Algebraic approach for robust localization with heterogeneous information. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(10):5334–5345.
- Miller, B., Manfredi, G., Pirjol, D., & Rouet, J. L. (2023). From chaos to cosmology: Insights gained from 1D gravity. *Classical and Quantum Gravity*, 40(7):073001.
- Moran, P. (1948). The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 10(2):243–251.
- Moran, P. A. P. (1966). Measuring the length of a curve. *Biometrika*, 53(3-4):359–364.
- Muandet, K., Fukumizu, K., Sriperumbudur, B., & Schölkopf, B. (2017). Kernel mean embedding of distributions: A review and beyond. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 10(1-2):1–141.
- Narayanan, R. P., Nordlund, J., Pace, R. K., & Ratnadiwakara, D. (2020). Demographic, jurisdictional, and spatial effects on social distancing in the United States during the COVID-19 pandemic. *Plos One*, 15(9):e0239572.
- Neumann, J. & Schoenberg, I. J. (1941). Fourier integrals and metric geometry. *Transactions of the American Mathematical Society*, 50.
- Pace, R. K. & LeSage, J. P. (2009). A sampling approach to estimate the log determinant used in spatial likelihood problems. *Journal of Geographical Systems*, 11(3):209–225.
- Perc, G. (1991). *Cantatrix sopranica L. et autres écrits scientifiques*. La Librairie du XX^e siècle. Seuil, Paris.

- Perec, G. (2003). *Penser/classer*. La librairie du XXI^e siècle. Éd. du Seuil, Paris, nouvelle édition.
- Pirsig, R. M. (1974). *Traité du zen et de l'entretien des motocyclettes*. The Bodley Head, London, réimpr. édition. Titre original: Zen and the art of motorcycle Maintenance: An inquiry into avlues, éd. française: Points.
- Raveché, H. J. & Kayser, R. F. (1978). Towards a molecular theory of freezing: The equation of state and free energy from the first BBGKY equation. *The Journal of Chemical Physics*, 68(8):3632–3643.
- Raveché, H. J. & Stuart, C. A. (1976). Bifurcation of solutions with crystalline symmetry. *Journal of Mathematical Physics*, 17(11):1949–1953.
- Santalo, L. A. (1976). *Integral geometry and geometric probability*. Addison-Wesley, London.
- Schoenberg, I. J. (1938). Metric spaces and positive definite functions. *Transactions of the American Mathematical Society*, 44:522–536.
- Schwab, M. G. & Smith, T. R. (1985). Functional invariance under spatial aggregation from continuous spatial interaction models. *Geographical Analysis*, 17(3):217–230.
- Scrucca, L. (2005). Clustering multivariate spatial data based on local measures of spatial autocorrelation. *Quaderni del Dipartimento di Economia, Finanza e Statistica*, 20(1):11.
- Soler, J., Carrillo, J. A., & Bonilla, L. L. (1997). Asymptotic behavior of an initial-boundary value problem for the Vlasov-Poisson-Fokker-Planck system. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 57(5):1343–1372.
- Stakhovych, S. (2010). *Advances in spatial dependence modeling of consumer attitudes with Bayesian factor models*. Thèse de doctorat, University of Groningen.
- Stakhovych, S. & Bijmolt, T. H. (2009). Specification of spatial models: A simulation study on weights matrices. *Papers in Regional Science*, 88(2):389–409.
- Stein, M. (1999). *Interpolation of spatial data*. Springer.
- Suzuki, T. (2012). Drift-diffusion model and 2D Brownian point vortices (modern approach and developments to Onsager's theory on statistical vortices). *Lectures at the Institute of Mathematical Analysis*, 1798:213–229.
- Torgerson, W. S. (1961). Theory and methods of scaling. *Journal of the American Statistical Association*, 56(294):430–433.
- Toshpulatov, G. (2023). Well-posedness and trend to equilibrium for the Vlasov-Poisson-Fokker-Planck system with a confining potential. *arXiv preprint arXiv:2310.12258*.

- Wilson, A. (1971). A family of spatial interaction models, and associated developments. *Environment and Planning A*, 3(1):1–32.
- Yao, Y. (2019). A mathematical introduction to data science. [Notes de cours non publiées]. Hong Kong University of Science and Technology.
- Young, G. & Householder, A. S. (1938). Discussion of a set of points in terms of their mutual distances. *Psychometrika*, 3:19–22.
- Zhang, C. (2003). Evaluation of irregular zone prominence based on geometric attributes. *Theory and Applications of GIS*, 11(1):53–59.
- Zhang, C. & Murayama, Y. (2003). Evaluation on the prominences of irregular areas based on spatial weight matrices. *Geographical Review of Japan*, 76(11):777–787.
- Zhou, O. & Lai, A. (2011). Suprasegmental contribution to the yelling reaction. experiments with stimulation and destruction. *Ztschr. f. d. ges. Neur. u. Psychiat.*, 56(130):631–677.
- Zhu, Y. & Diao, M. (2020). Understanding the spatiotemporal patterns of public bicycle usage: A case study of Hangzhou, China. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14(3):163–176.
- Østbye, S. & Westerlund, O. (2007). Is migration important for regional convergence? comparative evidence for Norwegian and Swedish counties, 1980–2000. *Regional Studies*, 41(7):901–915.