



HAL
open science

Pollution minière: une méthodologie intégrée depuis l'analyse spatiale

Hubert Mazurek, Debra Pereira, Luis Rojas, Jorge Centellas

► **To cite this version:**

Hubert Mazurek, Debra Pereira, Luis Rojas, Jorge Centellas. Pollution minière: une méthodologie intégrée depuis l'analyse spatiale. International Congress GeoTunis 2010, 5 th edition -“ The use of GIS and remote sensing for sustainable development ” -El Gazala Pole of Communication Technologies, Nov 2010, Tunis, Tunisie. 25 p. hal-02547402

HAL Id: hal-02547402

<https://hal.science/hal-02547402v1>

Submitted on 20 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

International Congress GeoTunis 2010, 5th edition – « The use of GIS and remote sensing for sustainable development » - El Gazala Pole of Communication Technologies, 29 November to 3 December, 2010

Pollution minière: une méthodologie intégrée depuis l'analyse spatiale

Hubert Mazurek¹, Debra Pereira², Luis Rojas, Jorge Centellas³

UMR151 – Laboratoire « Population, Environnement, Développement »,
IRD – Université de Provence
Centre St Charles, case 10
3, place Victor Hugo
13331 – Marseille Cedex 03
France
hubert.mazurek@ird.fr

Résumé

Oruro, en Bolivie, est une ville construite autour d'une activité minière de plus de 500 ans, basée sur l'exploitation de complexes polymétalliques hautement toxiques (Pb, Zn, As, Sb, Sn, etc.). Un programme de recherche multidisciplinaire (programme TOXBOL, financé par l'ANR) tente de comprendre les paramètres de pollution et leurs impacts sur la santé des enfants. L'équipe de socio-géographes s'est orientée vers une étude du risque urbain, en intégrant plusieurs de ses dimensions : le danger, les aléas, les vulnérabilités socio économiques et sanitaires, la perception de l'environnement et le comportement des populations. Ces paramètres furent étudiés à partir de sources différentes, mais toutes géo-référencées. Le propos de cet article est de décrire une méthodologie d'étude du risque en milieu urbain, d'ordre rémanent et permanent mais non « catastrophique » ou aléatoire.

Cette méthodologie est basée sur l'usage de données de terrain, de recensements, d'enquêtes et d'entrevues, autour des questions de perception des problèmes d'environnement et de santé, toutes gérées par un SIG avec lequel il est possible de tester des hypothèses quant à la superposition de phénomènes. Nous pourrions ainsi essayer de comprendre quels sont les apports de chaque variable dans la compréhension des effets de la pollution.

La présentation comprendra 4 parties : contexte et situation théorique en relation au risque ; méthodologie d'étude ; discussion sur les vulnérabilités à partir de l'étude cartographique ; l'usage du SIG dans la compréhension des pollutions.

Summary

Oruro, in Bolivia, is a city situated in the center of a mining activity of more than 500 years, with exploitation of highly toxic minerals (Pb, Zn, As, Sb, Sn, etc.). A program of multidisciplinary research (TOXBOL program, financed by the French ANR) tries to

¹ Géographe

² Sociologue

³ Economistes

understand the parameters of contamination and their impacts on the health of the children. The socio-geographer team turns to a study of the urban risk, by integrating some of its dimensions: the danger, the hazard, the socio economic and sanitary vulnerabilities, and the perception of the environment and the behavior of the populations. All these parameters results from different sources, but all are geo-referenced. The aim of this article is to describe a methodology of study of the urban risk, with the peculiarity that this risk is not a "catastrophic" one but a constant one. This methodology is based on field data, censuses, surveys and interviews, around the questions of perception of the problems of environment and health, all kind of data managed by a SIG with which it is possible to test hypotheses as overlapping of phenomena. We can so expect to understand what represents the contribution of each variable in the understanding of the pollution impact. The presentation will include 4 parts: context and theoretical situation in relation at the risk; methodology of study; discussion about the vulnerabilities from the cartographic study; the usage of the SIG in the understanding of the pollutions.

Introduction

Dans les recherches menées sur les risques naturels, la pollution minière tient une place particulière : les modalités du risque ne sont pas visibles, elles ne sont ni de caractère catastrophique, ni de caractère conscient ; il s'agit d'une contamination rémanente, par accumulation de résidus, dont les modes de diffusion sont peu connus et étudiés. Cette particularité remet en question un certain nombre de concepts utilisés pour étudier le risque, et nous impose une réflexion sur le terme même de risque et sur les paramètres qui permettent de le caractériser. En effet, le risque est un terme polysémique qui inclut de nombreuses situations depuis les événements tangibles immédiats (le tremblement de terre ou la catastrophe chimique) jusqu'aux défis psychosociologiques à long terme (risque social ou risque de société) (Bouyssou, 1997; Renn, 1998; 2008; Haines, 2009a). Longtemps l'analyse du risque a séparé ces diverses composantes, alors que l'imbrication des phénomènes physiques, biologiques et de société est évidente dans son fonctionnement. Pour cela, la pratique de l'interdisciplinarité est indispensable dans l'analyse et la gestion du risque (Renn, 2008).

La dimension spatiale est impérative dans l'étude du risque puisque ce dernier fait appel à une interaction entre deux éléments dans l'espace et dans le temps ; mais l'usage de l'analyse spatiale est souvent restreint aux données quantitatives exprimant une mesure en relation à l'aléa, la vulnérabilité ou aux impacts (zone d'inondation, nombre de maisons affectées, caractères socio économiques des familles, etc.). L'approche qualitative, en particulier à base d'enquêtes ou d'entrevues, n'y a pas vraiment sa place, surtout lorsqu'il s'agit de paramètres imprécis comme la perception ou le comportement des populations en relation à un phénomène. L'usage du SIG est réservé à la superposition de couches d'informations de localisation ou de délimitation, et néglige souvent les informations sur la société.

Nous nous situons ici dans un cas d'exploitation minière séculaire, où les méthodologies classiques d'évaluation du risque (liées aux zones sismiques, à la catastrophe industrielle, à l'inondation, et même à la toxicologie) ne s'appliquent pas.

Cette situation est cependant relativement commune dans le monde, dans les cas de pollutions diffuses (le mercure par exemple) ou de long terme (anciens sites miniers par exemple), de pandémie ou de changement climatique. Dans ces situations, le caractère physique du phénomène compte moins que la perception ou les pratiques de vie des populations concernées. Dans le cas de la contamination au mercure par exemple, ce sont les coutumes alimentaires, et de manière indirecte le niveau de vie ou la diversification alimentaire des populations, qui constituent le facteur primordial pour en limiter le risque toxicologique. Dans le cas du changement climatique par exemple, il est relativement difficile d'agir directement sur la diminution du CO₂ dans l'air, mais il est possible de le faire en changeant les comportements. Dans le cas de la pollution minière qui nous préoccupe ici, les comportements pourront jouer un rôle en relation avec les facteurs d'exposition aux éléments toxiques, ou dans la modification des modes de production. La traduction de ces variables au niveau de l'analyse spatiale demande la prise en compte de données de nature différentes et issues de méthodologies de collectes différentes. Le SIG s'avère alors un puissant outil intégrateur de l'information lorsque celle-ci est convenablement localisée, et organisée autour de principes méthodologiques bien établis.

L'objectif de cet article est de présenter une expérience de travail en commun entre géographes et sociologues (Mazurek *et al.*, 2010) destinée à essayer de comprendre les déterminants de la diversité des situations de contaminations, dans un espace minier très ancien, en construisant une démarche méthodologique basée sur la théorie du risque et sur les outils des SIG. Dans un premier temps, nous situerons le problème en relation au type de contamination et aux champs théoriques du risque, puis nous analyserons les différentes hypothèses construites au cours de l'étude, et les méthodologies d'acquisition de données qui leur correspondent ; et enfin, nous présenterons une synthèse basée sur l'utilisation d'un certain nombre de techniques simples de l'analyse spatiale.

Contexte et situation de l'étude

La ville d'Oruro en Bolivie s'est construite depuis le 16^{ème} siècle autour d'un centre minier basé sur l'exploitation d'importants gisements d'argent, d'or et d'étain, associés à des complexes polymétalliques où sont présents l'antimoine, l'arsenic, le zinc, le plomb, etc. (Almaraz, 1998; Velasco, 2000; Márquez, 2001). La ville, d'une population de 250 000 habitants pour une superficie de 31 km², est située sur l'Altiplano bolivien (voir carte 1), à près de 3700m d'altitude, dans un climat semi-aride, proche de deux lacs de haute biodiversité : le lac Uru Uru et le lac Poopo qui subissent directement l'influence des eaux acides chargés de métaux en provenance des mines. Les puits de mines sont situés sur une montagne au sein de la ville, et au centre d'une plaine de sols salins.

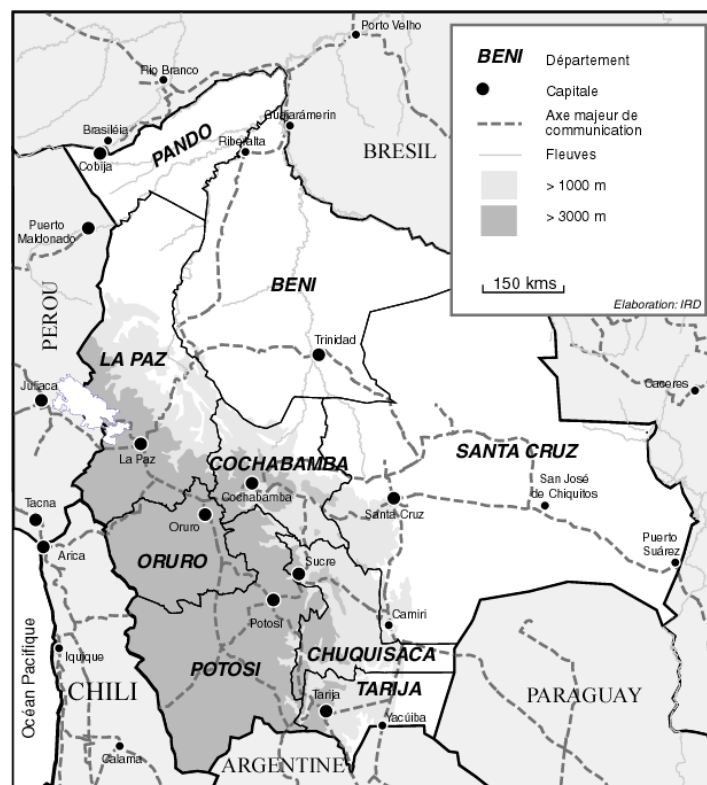
Par ailleurs, comme nous le verrons plus en avant, la ville est ponctuée d'industries liées ou non à l'activité minière : fonderies et usines métallurgiques, petites industries de transformation, usines chimiques, etc. ; toutes ces industries ne sont peu soumises à des contrôles environnementaux, bien qu'elles utilisent des substances toxiques pour le traitement des minerais, comme le mercure pour l'argent, le cyanure pour l'or ou l'antimoine pour l'étain.

La distribution et la structuration de l'habitat dans la ville (voir carte 2) est déterminante pour la compréhension des problèmes de toxicité dans la mesure où l'habitat se trouve directement en contact avec les multiples sources, et que des vents dominants provenant du Nord - Nord ouest, vont déterminer le degré d'exposition des zones aux polluants de l'air.

La première structure d'importance est constituée par la position des centres miniers : la mine d'Ito, de San José, et dans une moindre mesure l'ancien site de San Miguel (qui n'est plus exploité mais où sont présents de nombreux terrils). Le site d'Inti Raymi est difficile à considérer dans la mesure où il se trouve à l'écart de la ville ; l'impact de ses activités sont fortes sur le bassin versant du lac Titicaca, mais peu importantes sur l'espace habité voisin. Cette structure est située sur la montagne, et a une influence directe sur l'habitat situé sur les versants, souvent construit sur les accumulations de résidus miniers.

La seconde structure correspond à la localisation des centres de transformation et de sidérurgie ; Vinto à l'Est où se trouve une fonderie d'étain, et la zone industrielle, au Nord-Est, où se trouve plusieurs fonderies polymétalliques.

La troisième structure correspond aux périphéries de la zone urbanisée, où se localisent d'anciennes fonderies (la Metabol au sud par exemple, exploitée de 1903 à 1998), des industries chimiques extrêmement polluantes (comme YPFB hydrocarbures, ou de fabrication d'acide sulfurique ou de sulfure de cuivre comme la SAMCO, etc.), et des petites fabriques (appelées *ingenios*), souvent familiales, de transformation ou concentration des métaux.



Carte 1 : Situation de la Bolivie et de la ville d'Oruro, Capitale de département du même nom

Le contexte de production est lui aussi à prendre en compte. L'activité minière était gérée jusqu'en 1991 par la COMIBOL, entreprise d'Etat qui disposait d'infrastructures techniques et d'un contrôle environnemental relativement efficace. La privatisation du

secteur minier a eu pour conséquence la fragmentation du secteur en petites coopératives, souvent familiales, qui n'ont jamais eu les moyens d'investir et encore moins de contrôler les rejets (Loayza & Franco, 2001; Dames & Moore, 2002; Möeller *et al.*, 2002; Michard, 2008). Les conditions de production sont aujourd'hui extrêmement des-contrôlées et beaucoup de techniques d'extraction extrêmement polluantes.

La pollution se matérialise par trois éléments principaux : 1 - les poussières provenant des terrils, du transport des minerais ou du traitement du minéral dans les petites fabriques (*ingenio*), 2 - l'eau d'infiltration des terrils (*agua de copajira*), qui parcourt régulièrement les rues du centre de la ville ; c'est une eau acide sortant des puits de mines, canalisée sur une grande partie mais infiltrant les eaux souterraines ou les lacs voisins, 3 - les rejets des nombreuses industries, principalement sous forme de passif environnemental ou de gaz et microparticules.

La diffusion spatiale de ces éléments polluant n'est pas connue et fait l'objet d'une étude spécifique de l'équipe de géochimiste ; elle est très complexe du fait de la multitude des sources de pollution et de la complexité du maillage spatial.

L'approche théorique

Le risque est un terme polysémique et trivial qui est utilisé pour de multiples situations, dans de multiples contextes. Son évaluation, sa gestion ou sa prévention doivent considérer de multiples acteurs et échelles d'interaction, de perception ou d'action, dans lesquels interviennent de multiples facteurs aussi bien physiques que biologiques ou psychologiques, voire existentiels (Renn, 1998; Covello & Sandman, 2001; Langford, 2002; Dauphiné, 2003; Renn & Klinke, 2004; Haines, 2009a). Dans les approches du risque naturel (séismes, inondation), subjectif (le risque de perdre, conflit), externe (risque industriel), internalisé (fumer, conduire), soudain (tsunami), psychosocial (forme de vie), etc., beaucoup de modèles ont été développés répondant à des préoccupations disciplinaires ou sectorielles, cherchant la plupart du temps à cerner la distinction entre réalité (estimation des dommages, des conséquences) et possibilités (aléa, danger) (Renn, 1998), mais qui sont peu adaptés à notre situation.

Les approches techniques ou formelles (Thyrion, 1967; Brockband *et al.*, 1991; d'Ercole *et al.*, 1994; Péguy, 1995; Vertzberger, 1995; Hampel, 2006), ont été reprises par l'épidémiologie ou la toxicologie sous la forme d'un produit entre la probabilité de contact avec un élément toxique et la toxicité de cet élément. Dans le cas de la pollution minière, ce modèle est très utile au niveau individuel mais peu applicable dans des situations de contaminations rémanentes, pour lesquelles il n'existe pas de probabilité événementielle ni d'étude in situ de la toxicité. La prise en compte d'un paramètre de vulnérabilité dans les études de risque, plutôt liée aux écoles françaises de géographie (Salem *et al.*, 1992; Balkau, 1993; Maskrey, 1993; d'Ercole *et al.*, 1994; Péguy, 1995; Bailly & (dir.), 1996) a permis de considérer la variabilité de la réponse à des situations de risque qui ne sont jamais déterministes. Dauphiné, 2003, définit alors le risque comme le résultat de la conjonction entre la probabilité d'apparition d'un phénomène (aléa en français) et la vulnérabilité de la société. Les sociologues ont, eux, essayé de définir cette variabilité des réponses par des approches extrêmement diverses, mais complémentaires, en prenant en compte le rôle de l'information ou de l'incertitude, de la perception ou du comportement sur la réaction au risque et sur la mesure de la résilience des

sociétés. La théorie de la décision reste centrale dans ces approches (Jorland, 1993; Sjöberg, 2000; Slovic, 2000; Covello & Sandman, 2001; Peretti-Watel, 2001; Beck, 2002; Lemkow, 2002; Hovden, 2003; Arreghini & Mazurek, 2004; Renn, 2008; Gilbert, 2009; Haines, 2009b; Abt *et al.*, 2010). Dans les approches récentes, l'analyse du risque dépasse la mesure de la probabilité des événements et des effets, pour composer des modèles systémiques qui prennent en compte une série d'étape de formation de la pensée depuis la perception du risque jusqu'à l'action contre le risque, comme indiqué sur le schéma 1.

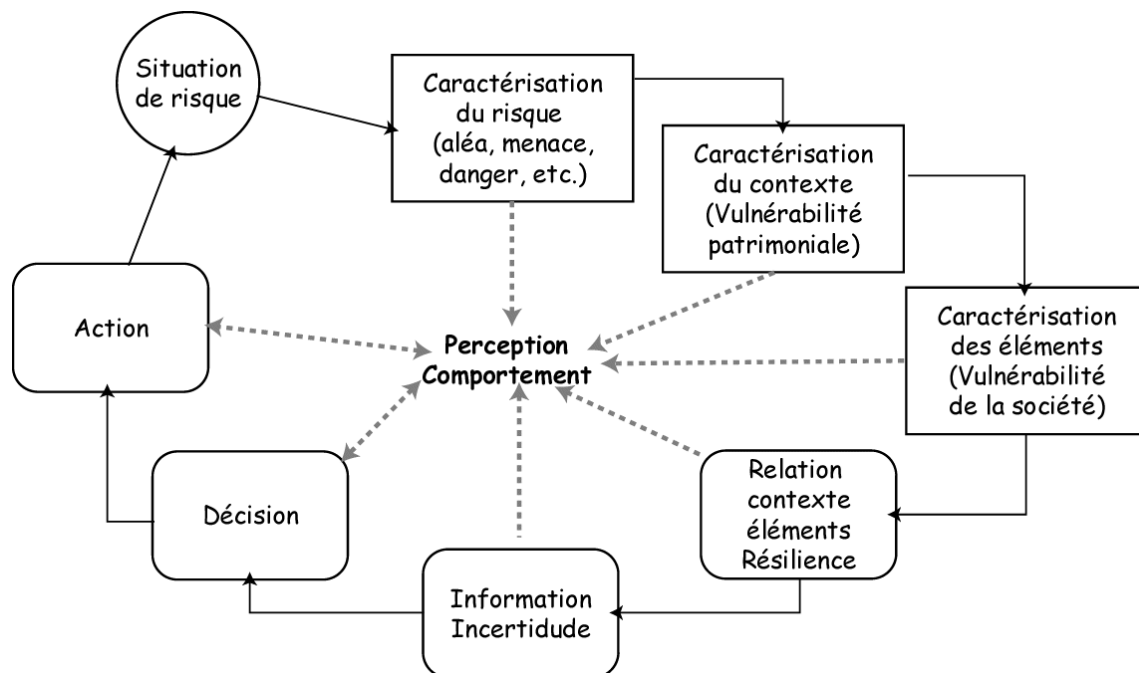


Schéma 1 : le circuit psycho-social de la réaction au risque

Dans la situation qui nous préoccupe, la pollution chronique, il est très difficile d'utiliser les critères de risque appliqués traditionnellement dans les études sur le risque naturel, et notamment les probabilités d'apparition de phénomènes (aléa, menace, danger, fréquence d'évènement, etc.) ou de dommage (impact direct ou indirect des facteurs de risque).

La notion d'aléa ne s'applique pas : il n'y a pas d'évènements particuliers, ni de fréquence d'apparition des phénomènes ; La pollution est continue et difficilement définissable. Tout au plus pouvons nous considérer cette pollution comme une menace, mais difficilement caractérisable, ou mieux comme danger en caractérisant les propriétés intrinsèques du danger : nature des éléments (métaux lourds) et leur toxicité (difficilement mesurable *in situ*). Du point de vue de la caractérisation du risque, nous ne disposons ainsi d'aucun paramètre « classique » de mesure sinon d'une estimation d'un potentiel polluant en fonction de la connaissance des activités de certains sites.

La probabilité d'occurrence ou d'impact est, elle aussi, difficilement calculable. Par ailleurs, la vulnérabilité physique n'a pas vraiment de signification, et seul la vulnérabilité sociale peut avoir une influence sur les modalités de la contamination, au sens de Dauphiné, 2003. En effet, l'impact de ce type de pollution se manifeste

principalement sur des facteurs de santé, mais les mauvaises conditions de vie et d'habitat de ces populations rendent difficiles le discernement entre les problèmes liés à la pollution et les problèmes généraux liés à une mauvaise hygiène, à la malnutrition, au manque d'accès aux systèmes de soins, etc. Dans ce sens, il est possible de caractériser une vulnérabilité à partir de critères sociaux et de conditions de vie qui peuvent nous donner une indication sur l'exposition potentielle des populations aux divers polluants ; sans pouvoir en déterminer les causes ni les effets.

Cependant, plus que des paramètres socio économiques classiques dont on peut difficilement expliquer le rôle, ce sont des critères de perception et comportement qui permettront, non de réduire directement l'exposition ou la toxicité mais d'influencer les politiques de prévention ou d'action. Dans le schéma1, ces deux critères sont au centre du dispositif et vont moduler la décision et l'action en relation à la réaction au risque.

L'approche qu'il est par conséquent nécessaire d'envisager pour l'étude des risques en général est une approche par système (ou vecteurs) qui combinent les éléments d'analyse que nous avons à notre disposition. Ces éléments d'analyse ont été classés suivant trois grandes hypothèses de travail décrites dans le schéma 2.

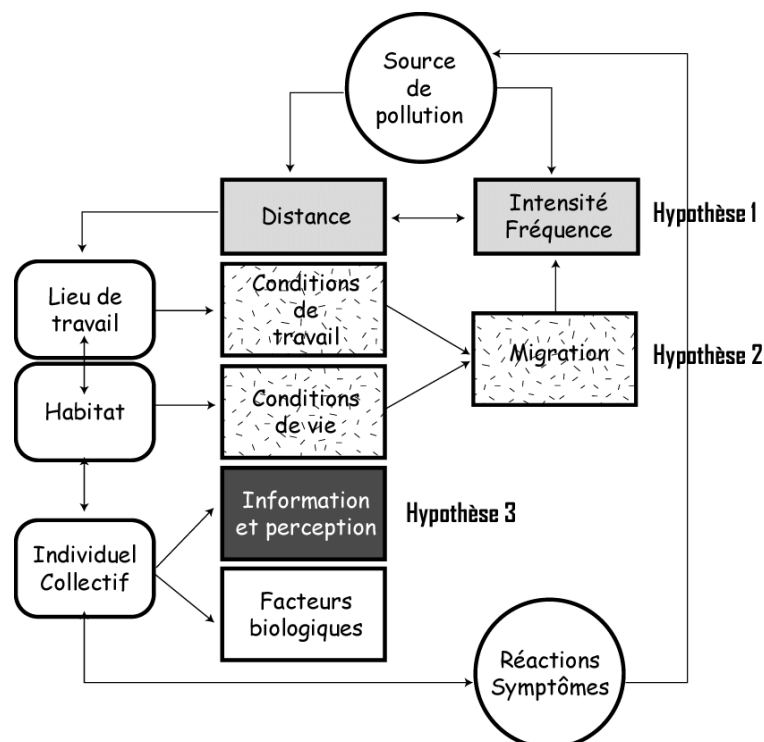


Schéma 2 : les trois hypothèses méthodologiques

Les sources de pollution sont localisées par leur potentiel (intensité et fréquence théorique de rejets) et par la distance entre cette localisation et l'élément contaminé. La première hypothèse se propose de répondre à la question de savoir si la proximité spatiale est un facteur discriminant de réaction au risque. Cette distance est relative au lieu de travail (endroit le plus proche) et au lieu de vie (plus ou moins éloigné). Le premier dépend des conditions de travail et le second des conditions de vie ; toutes deux influencées ou influençant la mobilité ou la migration. Ce dernier facteur est

important bien que peu maîtrisé dans les analyses, car le degré de mobilité conditionne la durée et l'intensité d'exposition aux éléments toxiques.

La deuxième hypothèse est relative au caractère pertinent de la situation sociale, économique ou sanitaire des populations exposées. Les réactions ou symptômes résultants de la pollution seront influencés par des contextes individuels (les facteurs biologiques que nous ne pouvons maîtrisés, et ne prendront pas en compte dans cette étude) et les facteurs collectifs (information et perception) que nous pouvons essayer de comprendre.

La troisième hypothèse est par conséquent relative à l'apport de la connaissance de la perception et du comportement des populations sur la résilience.

Méthodologies

Cette étude correspond à la partie des recherches en sciences sociales réalisées dans le cadre du programme TOXBOL⁴ (Origine des pollutions polymétalliques et impact sur l'environnement, la santé et la société : Etude dans une ville minière de l'Altiplano bolivien), programme multidisciplinaire associant les sciences médicales, géochimiques, écologiques, géographiques et sociologiques, financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche). L'objectif de ce programme est de comprendre les mécanismes de contamination des populations par les métaux lourds et leurs impacts sur la santé, particulièrement des enfants. L'équipe de sciences sociales composée de géographes, économistes et sociologues, avait pour mission la caractérisation des vulnérabilités des populations sur l'espace considéré, et la compréhension des perceptions et comportements des acteurs vis-à-vis de cette vulnérabilité.

La méthodologie utilisée par l'équipe sciences sociales s'est organisée autour de quatre phases :

- L'assemblage d'un SIG autour de données de base fournies par les différentes institutions publiques ou de recherches⁵ :
 - o Création du modèle numérique de terrain à 20m à partir des cartes de l'Institut Géographique Militaire et du DEM de l'USGS ;
 - o Création des couches de base (hydrologie, réseaux de communication, localisations des services, etc.) ;
 - o Géo-référencement en système WSG84, UTM19S des images satellitaires (Landsat et mosaïque Google) et de l'ensemble des informations géographiques;
 - o Correction et mise à jour du fond de carte urbain;
- Le recensement des sources potentielles de contamination fut réalisé à partir d'une base de données de la mairie sur les entreprises, vérifiée et complétée par des relevés de terrain et des entrevues spécialisées ; l'ensemble des données a été récolté au moyen d'un GPS ;

⁴ Ce programme, sous la responsabilité de Jacques Gardon, associe les Unités de recherches UR24, UMR151, UMR154, UR131 de l'Université – IRD – CNRS de France ; l'IINSAD de l'Université Majeur de San Andrés, La Paz, Bolivie ; La Faculté de Pharmacie de La Paz, Bolivie ; la Faculté de Médecine de l'Université Technique d'Oruro, Bolivie ; Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, Sao Paulo, Brésil ; l'Université du Chili, Santiago du Chili.

⁵ Nous tenons à remercier tout particulièrement la Mairie de Oruro, et sa Direction de l'aménagement du territoire, pour le soutien qu'elle nous a apporté dans la mise à disposition de l'information et dans la facilitation pour le travail de terrain et d'enquêtes.

- Le traitement du recensement de la population de l'année 2001, fourni par l'INE (Institut National de la Statistique), au niveau du bloc de maison, pour le calcul de la vulnérabilité socio démographique ;
- La réalisation d'une enquête auprès de 1700 familles pour le traitement des informations de perception, de comportement et de vulnérabilité sanitaire.

L'évaluation de la situation de la contamination : l'hypothèse de proximité spatiale.

Dans l'estimation du risque, la pollution minière rémanente pose trois problèmes d'analyse : l'effet, la cause et la représentation.

L'effet : nous avons vu que, à la différence de la théorie classique du risque naturel, l'aléa, la menace ou le danger n'ont pas vraiment de signification et d'utilité ; ils sont par là même difficilement mesurables. Il n'y a pas de probabilité d'occurrence de phénomènes, car la contamination s'effectue de manière continue et par des voies de diffusion difficilement démontrables.

La cause : il est quasiment impossible d'établir des relations de cause à effet entre la source et la cible, car ces sources sont nombreuses et leur toxicité est difficilement mesurables *in situ*. La confrontation de nos données avec celles des géochimistes devrait être, dans une étape ultérieure, riche d'enseignements.

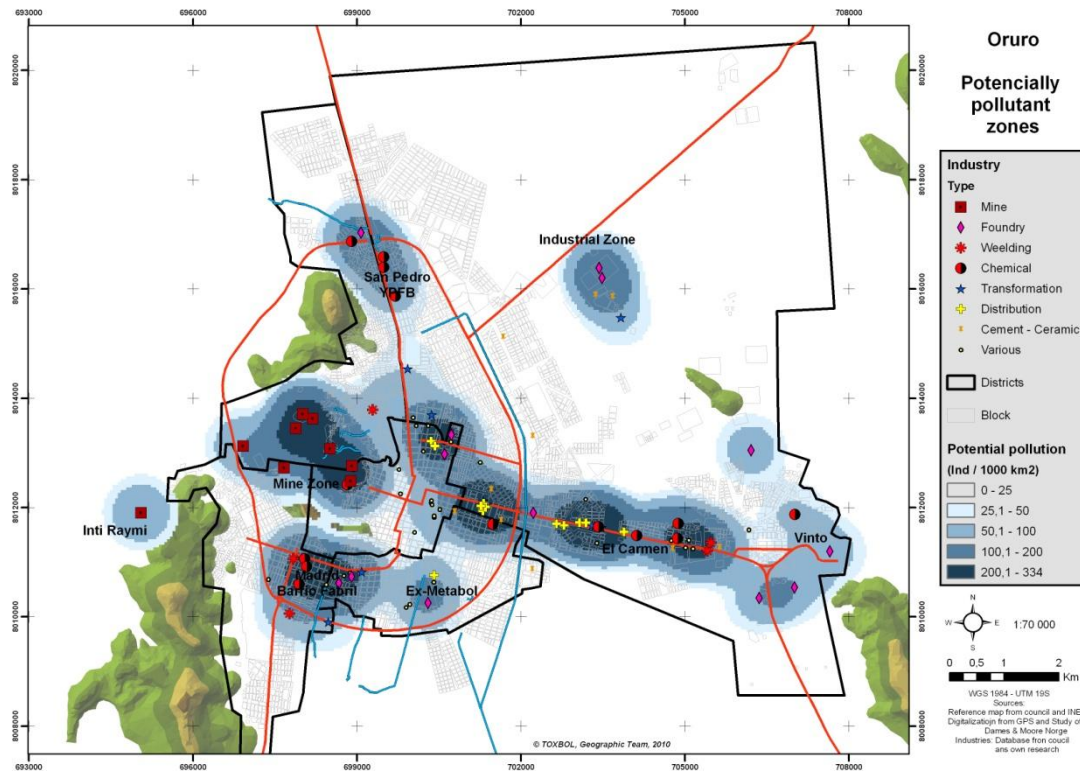
La représentation : la plupart des méthodes utilisées dans les études de risques, et en particulier les méthodes d'interpolation, n'ont pas vraiment de sens pour notre problématique. Il s'agit en effet d'analyser des phénomènes de proximité et de superposition de critères, plutôt que d'estimer l'influence d'éléments toxiques. Il nous importe plus de savoir si une zone présente une structure spatiale particulière, plutôt que de connaître la valeur estimée d'un paramètre sur un point du territoire.

Pour toutes ces raisons nous avons opté pour une méthodologie semi-quantitative à base de critères qualitatifs, utilisant d'une part une estimation du potentiel de contamination des entreprises et d'autre part une mesure de la densité de ce potentiel dans l'espace.

Le résultat est présenté sur la carte 2. Chaque type d'entreprise a été recensé en attribuant une note variant de 10 à 100 selon son potentiel de pollution : le maximum correspond aux mines et à leur entourage immédiat (terrils), la hiérarchie ordonne ensuite, par ordre décroissant de potentiel contaminant, les grandes fonderies, l'industrie métallurgique qui traite des alliages ou des produits annexes, l'industrie chimique qui peut avoir ou non un rapport avec l'activité minière, la petite entreprise de transformation des minerais (*ingenios*) qui ont un impact local fort par les poussières qu'elles engendrent (transport et manutention), les distributrices de minerais, et, en bas de l'échelle, les industries gênantes mais peu polluantes (cimenterie, céramique, agro-alimentaire, etc.).

Deux types de méthodes nous intéressent pour montrer l'influence de ces entreprises sur leur environnement immédiat : la densité spatiale et la mesure d'une zone d'influence (buffer). On peut ainsi apprécier sur la carte les noyaux durs de la pollution et les zones qui devraient être affectées par cette pollution. On remarque une extension importante autour des centres miniers qui incluent les trois mines principales (Itos, San José et Mina Colorada) et un ancien centre (San Miguel). La partie nord compte deux zones de concentrations : YPFB (Centre de stockage de pétrole et industries chimiques) et la zone industrielle (un *ingenio*, deux fonderies et une cimenterie). La partie sud compte deux zones de concentration : le site de l'ex-

Metabol où est stocké un passif environnemental considérable, et le barrio fabril et barrio Madrid ont sont présentes de nombreuses et diverses industries dont la SAMCO qui a fait l'objet de nombreux conflits de voisinage à cause de ses rejets de fumées acides et soufrées (fabrique d'acide sulfurique). Enfin, il existe un axe ouest Vinto – El Carmen – Rosario, qui concentre un grand nombre de petites industries de transformation et la grande fonderie d'étain de Vinto.



Notre hypothèse fait supposer que ces zones de concentrations d'industries potentiellement polluantes sont des zones de vulnérabilité sévère au regard de l'impact sur les populations. D'autres méthodes ont été utilisées (dont la modification des paramètres de density –du Spatial Analyst de Arc GIS, ou les buffers) qui ont montré la robustesse de ce type de structuration spatiale.

Cette hypothèse devra être vérifiée suite à une confrontation avec les données de répartition des particules aériennes de métaux lourds, mesurées par les géochimistes, et les données de toxicité relevées par les médecins biologistes.

La prise en compte de paramètres de la vulnérabilité socio-économique

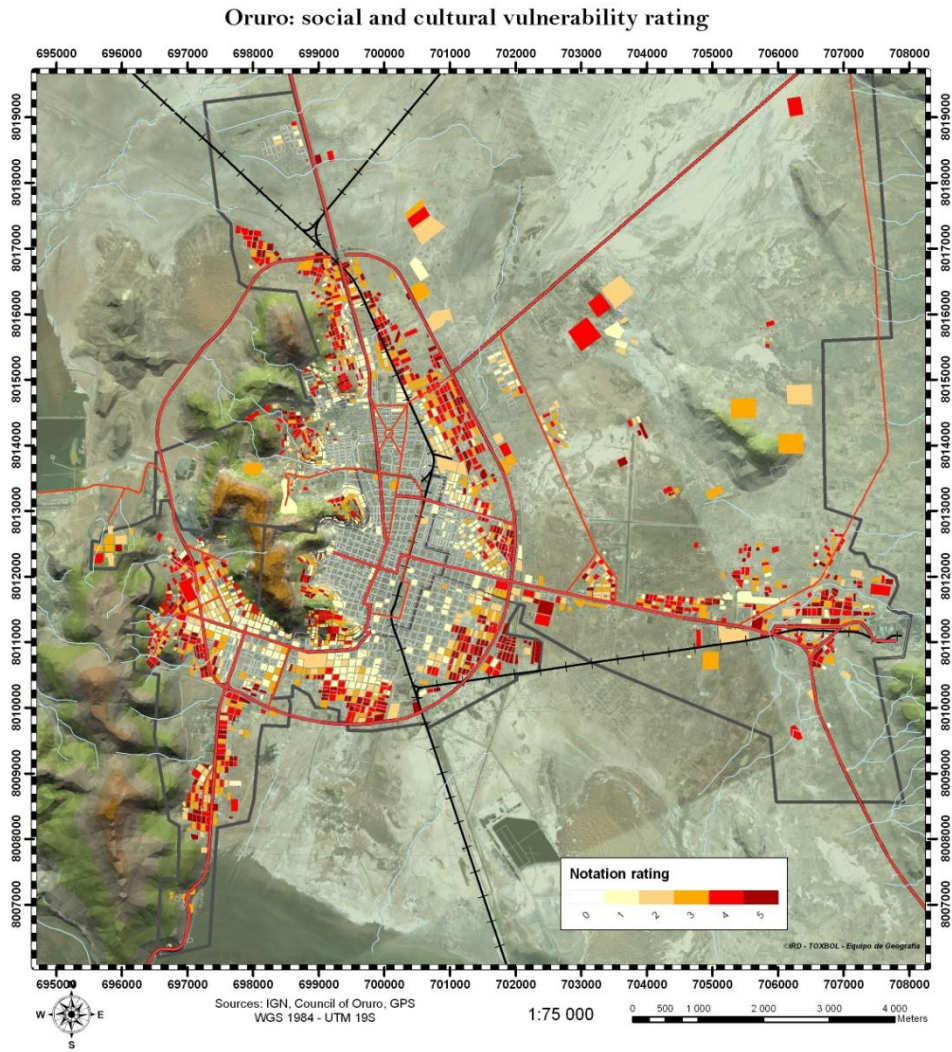
Les méthodologies d'analyse du risque naturel ou d'épidémiologie intègrent des variables socio-économiques qui sont censées refléter les contextes de la vulnérabilité (voir Becerra *et al.*, 2009; d'Ercole *et al.*, 2009). Il est certain qu'en matière de santé publique, les conditions de vie ou sanitaire peuvent jouer un rôle fondamental dans le développement de pathologies ; dans le cas de séismes par exemple, les conditions de l'habitat sont fondamentales. Dans notre problème, il n'est pas certain que ces paramètres soient de bons critères de représentation de la vulnérabilité. On peut en effet supposer que le mode de contamination principal

étant les particules présentes dans l'air, le critère de proximité est prédominant sur le critère du mode de vie, ce dernier reflétant souvent le premier. Par contre, si nous intégrons à notre analyse des critères de perception ou de comportement, les modes de vie deviennent pertinents, car ils déterminent des conduites passives ou actives en relation aux situations polluantes. C'est dans cet esprit que nous avons choisi cinq critères qui nous semblaient pertinents du point de vue de la vulnérabilité de la société à la pollution et du point de vue spatial:

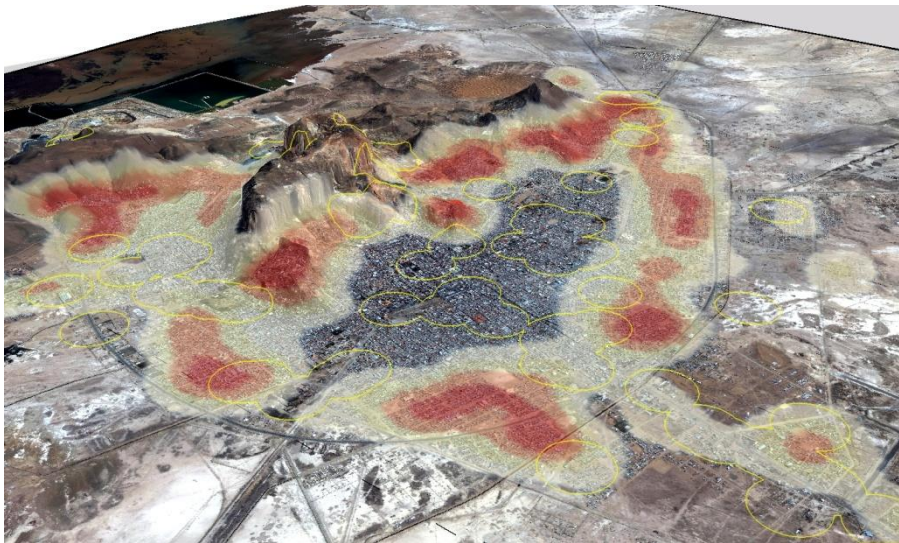
- La densité d'enfants de 0 à 5 ans, car ce sont les enfants de ces âges qui sont le plus sensibles à l'influence des métaux lourds (problèmes de croissance, de développement moteur ou mental, saturnisme, malformations, etc.). Les zones de forte densité sont par conséquent des espaces particulièrement vulnérables à l'échelle de la société ;
- Le taux de dépendance des familles (rapport du nombre d'inactifs sur le nombre d'actifs) représente le niveau de vie de ces familles, qui peut influencer des niveaux d'accès aux soins de santé ou de nutrition ;
- La proportion d'adultes sans aucun niveau d'éducation représente un facteur limitant dans l'accès à l'information, la compréhension des phénomènes, et dans les politiques de prévention ;
- La proportion d'accouchement à domicile est un indicateur de pratiques culturelles. Dans la mesure où l'accouchement est gratuit et qu'il n'y a pas de problème d'accessibilité aux centres de soins, l'accouchement à domicile relève d'un comportement de défiance vis-à-vis de l'institution sanitaire, ou d'influence de pratiques religieuses ou culturelles particulières ;
- La proportion de maisons sans eau ou sans sanitaire est un indice qui résume la condition de l'habitat. Il est souvent lié, en milieu urbain, à la non consolidation de l'habitat et, dans ce qui nous préoccupe, à des habitats peu étanches en relation aux poussières (toit non consolidé, fenêtres peu étanches, sols de terre battue, etc.).

Pour chaque variable est attribuée une note de 0 lorsque sa valeur est inférieure ou égale à la moyenne, ou de 1 lorsqu'elle est supérieure à la moyenne. La somme des 5 notes nous indique le cumul de situation de vulnérabilité sociale. L'utilisation du recensement de la population permet de travailler au niveau de la famille ou du bloc de maison (*cuadra*) et d'obtenir une représentation cartographique précise de cet indicateur (carte 3).

Dans ce traitement de variables également, l'interpolation n'a pas de sens car chaque unité de base (*la cuadra*) dispose d'une donnée, des méthodes comme l'analyse de tendance ou la densité locale permettent de généraliser de manière plus efficace. De plus, des modes de représentation en 3D permettent de mieux estimer l'organisation spatiale de ces vulnérabilités, en relation avec la localisation des sites potentiellement contaminants, représentés sur la carte 4 par les zones de buffer à 250m d'influence.



Carte 3 : Indice de vulnérabilité socio-économique



Carte 4 : représentation 3D de la densité de la vulnérabilité socio économique et de la localisation des entreprises potentiellement polluantes (buffer à 500m)

La distribution de cet indice montre une structure centre – périphérie, typique des villes en expansion rapide, disposant d'un centre consolidé et d'un habitat périphérique précaire. On remarque par ailleurs que l'implantation des entreprises potentiellement polluantes est beaucoup plus centrale, car antérieure à la construction de ces zones périphériques. La vulnérabilité socio économique ne présente pas de coïncidence spatiale primordiale, sauf dans certains quartiers très spécifiques qu'il faudra analyser de manière plus précise ; il s'agit en particulier des quartiers urbanisés sur les sites miniers même, ou aux abords d'industries très polluantes comme YPFB au nord, la Metabol au Sud ou la fonderie de Vinto à l'ouest.

L'appréciation de la perception au moyen d'enquêtes semi-quantitatives

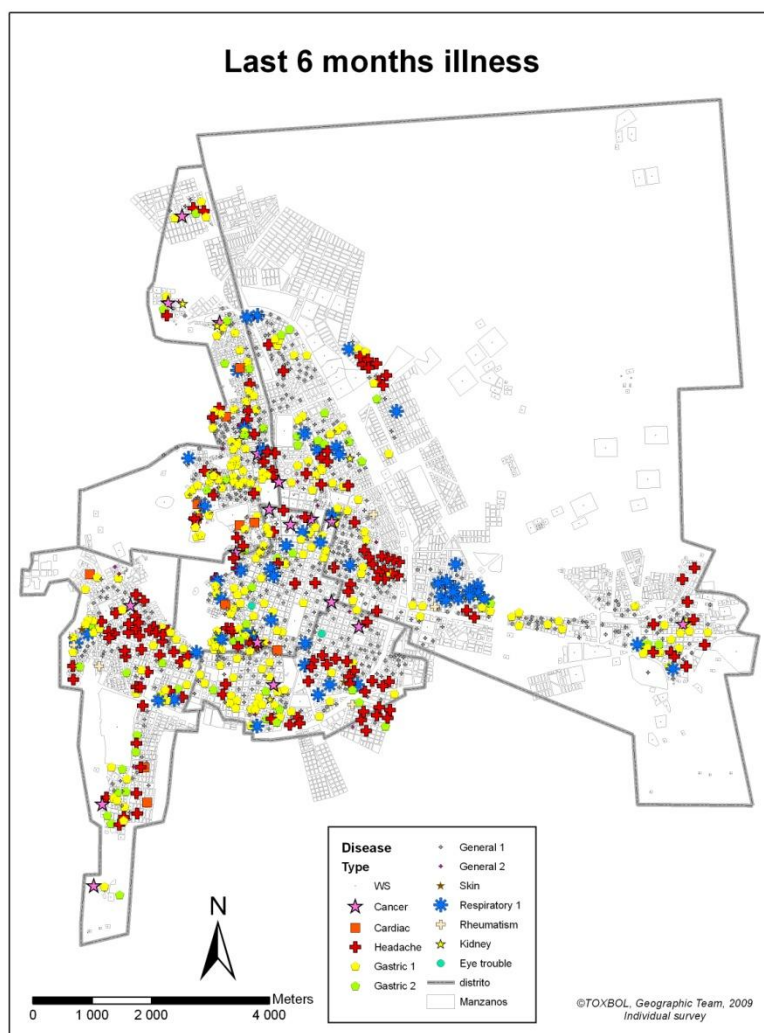
L'usage des recensements n'est pas suffisant pour donner une image de la perception des modes de vie et de la qualité de l'environnement de vie. L'usage d'enquêtes spécialisées est un outil souvent indispensable à condition que l'échantillonnage permette une réponse adéquate aux objectifs fixés. L'enquête que nous avons menée auprès de 1700 familles (7010 individus) avait pour but de vérifier, voire de mettre à jour les données du recensement sur les variables quantitatives, faire une estimation de la vulnérabilité des populations en relation à leur santé, et d'estimer quelques paramètres de perception et de comportement en relation à l'environnement.

Afin de permettre une représentation et une analyse homogène sur l'espace considéré, nous avons opté pour un échantillonnage systématique en relevant une famille au hasard dans un bloc de maison sur deux (1700 familles sur 2907 blocs au total) ; échantillonnage qui, selon Frontier, 1982, s'avère très efficace (plus efficace que l'aléatoire simple) pour éviter une sélection d'éléments privilégiés ou remarquables.

En ce qui concerne **la santé**, le questionnaire comprenait des questions multiples sur les maladies contractées par les membres de la famille tout au long de leur vie et les 6 derniers mois, sans classification préalable. La classification s'est faite *a posteriori* en fonction de trois critères : la gravité de la maladie, son caractère chronique et sa possible liaison avec une toxicité aux métaux lourds. L'objectif n'est pas évidemment d'établir une relation de cause à effet entre la proximité à un centre potentiellement contaminant et les états de santé, ni d'effectuer des statistiques de maladies (dans la mesure où il n'y a pas de référent national). Le but en est de repérer des situations collectives, c'est-à-dire des phénomènes agroupés dans l'espace, et de le traduire en un indice de vulnérabilité spatiale. Ces situations spatiales peuvent être liées à l'existence réelle de maladies ou à une perception spécifique liée à des phénomènes de groupe (maux de tête par exemple). Dans tous les cas, c'est le critère de perception qui nous intéresse lorsqu'il révèle des structures spatiales originales, comme phénomène social de groupe.

L'exemple représenté par la carte 5 montre bien cette méthode : on peut effectivement détecter, sur l'espace municipal, des zones où les déclarations sont plus nombreuses, mais aussi des masses spécifiques de maladies, en particulier les maux de tête, les maladies respiratoires et les problèmes gastriques. La densité (méthode density de Spatial Analyst de Arc GIS) est ici aussi la méthode la plus

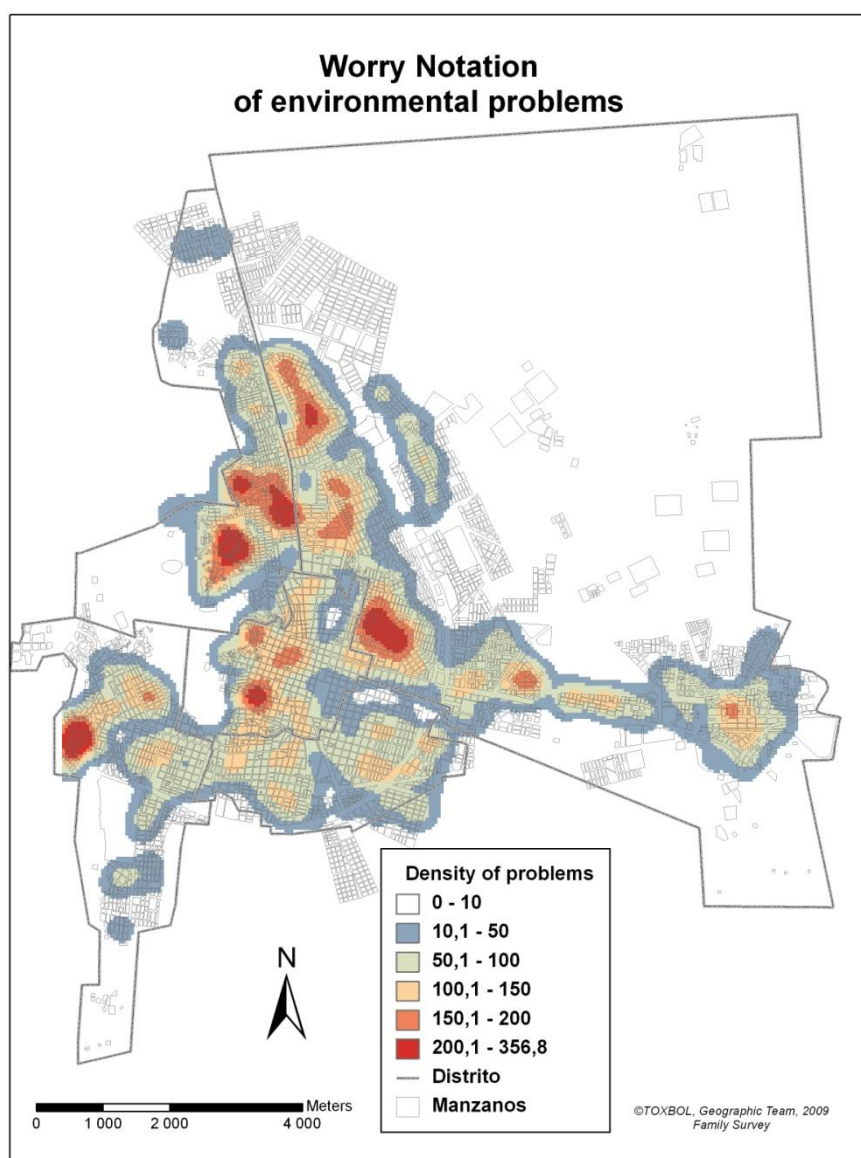
pertinente pour construire un indice de vulnérabilité qui montre la concentration spatiale de certains phénomènes.



Carte 5 : localisation des déclarations des maladies contractées depuis 6 mois

En ce qui concerne **la perception** des problèmes d'environnement, le recoupement de plusieurs questions de l'enquête⁶ permettent de construire un indice de perception à partir d'une notation de l'appréciation, par les familles, de leur préoccupation en relation aux problèmes d'environnement, quels qu'ils soient. Cette analyse, représentée sur la carte 6 au moyen de la méthode des densités, permet de se rendre compte du degré de connaissance ou d'investissement social des population vis-à-vis d'un problème, et aussi des possibilités d'intervention ou d'action politique vis à vis de ces problèmes : action sur les pratiques habituelles, actions ponctuelles de prévention, prévision des conflits, modification des pratiques, etc.

⁶ Les trois questions principales utilisées sont: «les 5 préoccupations majeures de votre famille », « estimation des problèmes d'environnement dans votre ville », « estimation des problèmes d'environnement dans votre quartier ». A ceci s'ajoute des questions sur l'investissement personnel dans les questions d'environnement, sur la connaissance des projets, et sur l'implication des institutions publiques.

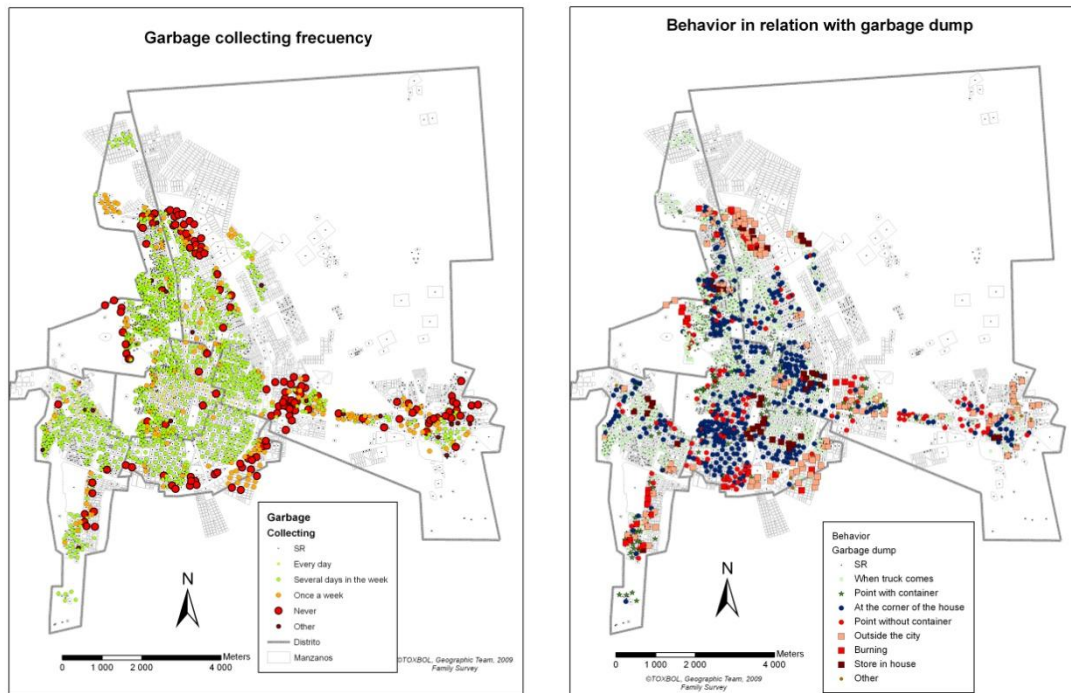


Carte 6 : Degré de préoccupation des familles pour les questions d'environnement

L'analyse de cette carte 6 est évidemment très complexe, et a nécessité la réalisation d'une quarantaine d'entrevues auprès de divers groupes sociaux, pour essayer de comprendre les mécanismes qui fondent cette perception. En particulier, cette perception n'est pas toujours liée aux problèmes miniers, pourtant omniprésents. La perception s'avère souvent très locale, et immédiate (proche de la maison et sur des problèmes du quotidien) ; les problèmes de pollution sont par ailleurs très vastes et hiérarchisés en fonction de ces préoccupations immédiates : pollution automobile, bruit, mauvais fonctionnement des réseaux d'égout, ordures ménagères, etc.

En ce qui concerne **le comportement**, Il a été abordé dans l'enquête à partir de problématiques qui permettaient de se rendre compte de pratiques spatialisées, et donc d'effets collectifs, en relation principalement avec un modèle culturel ou reflétant un mode de vie ou une qualité de vie. Nous avons considéré par exemple la qualité de l'eau (perception du goût de l'eau et pratique de consommation), le ramassage des ordures ménagères, premier problème de pollution selon les

habitants de Oruro (fréquence de ramassage et pratique des familles en relation au dépôt des ordures), les lieux de jeux des enfants et en particulier la distinction entre ceux des garçons et ceux des filles, qui se sont avérés relativement différents, etc. L'exemple suivant, représenté sur les cartes 7 et 8, montre la différence significative entre la fréquence de ramassage des ordures ménagères, et le comportement des familles en relation à ces ordures.



Carte 7 (gauche) : Fréquence de recollection des ordures ménagères
 Carte 8 (droite) : Comportement de la famille en relation aux ordures ménagères

Alors que le ramassage est fréquent dans la plupart des quartiers (sauf dans les zones périphériques ne disposant pas de services consolidés), on observe que le comportement des familles est très variables : certaines déposent les sacs au coin de la rue, d'autres dans les espaces avec containers, d'autres les stockent chez eux plusieurs jours ou semaines avant de les jeter, d'autre enfin les jettent en dehors de la ville ou les brûlent, etc. Ce comportement est collectif au sens spatial du terme ; il renseigne sur la capacité de réaction des populations en relation à un problème spécifique. Dans le cas des ordures ménagères, ce comportement collectif est le résultat d'une connaissance (règles d'hygiène, législation), d'une perception (qualité de vie, relation espace public – espace privé), et d'une action (ou manque d'action).

L'usage des SIG dans la compréhension des contaminations

Lorsque l'on est face à une situation de risque permanent, dont les effets se manifestent sur le temps long, les relations de cause à effet sont diluées dans une masse d'information qui comprend à la fois de facteurs d'interactions physiques comme psychologiques. Du point de vue méthodologique, les sources d'information qu'il faut mobiliser sont très variables : information de recensement, d'enquêtes, de relevés de terrain, d'entrevues, etc. Les méthodes de représentations cartographiques peuvent être elles aussi dépendantes des modes de collectes. De multiples situations correspondent à ce type de risque : les risques de la vie

quotidienne (fumer, conduire, pratiquer un sport, ...), les situations de pollution rémanente dont les symptômes ne sont pas spécifiques (mines de charbon, de métaux lourds, ..), et aussi les risques liés aux changements à moyenne échelle comme le changement climatique dont les effets sont peu visibles au cours du cycle de vie humaine.

Le SIG est un outil qui permet de combiner ces informations, à condition que les hypothèses et les modalités de traitement soient maîtrisées pour que cette combinaison ait un sens du point de vue de l'interprétation.

Nous avons traité cette multiplicité au moyen de trois principes: 1 - toutes les informations sont géo-référencées sur une même base ; 2 – les traitements sont orientés vers la connaissance des structures spatiales et non vers l'élaboration de statistiques spatiales ; 3 - la compréhension des problèmes de pollution passe par l'étude de la coïncidence spatiale, et non de relations de cause à effet.

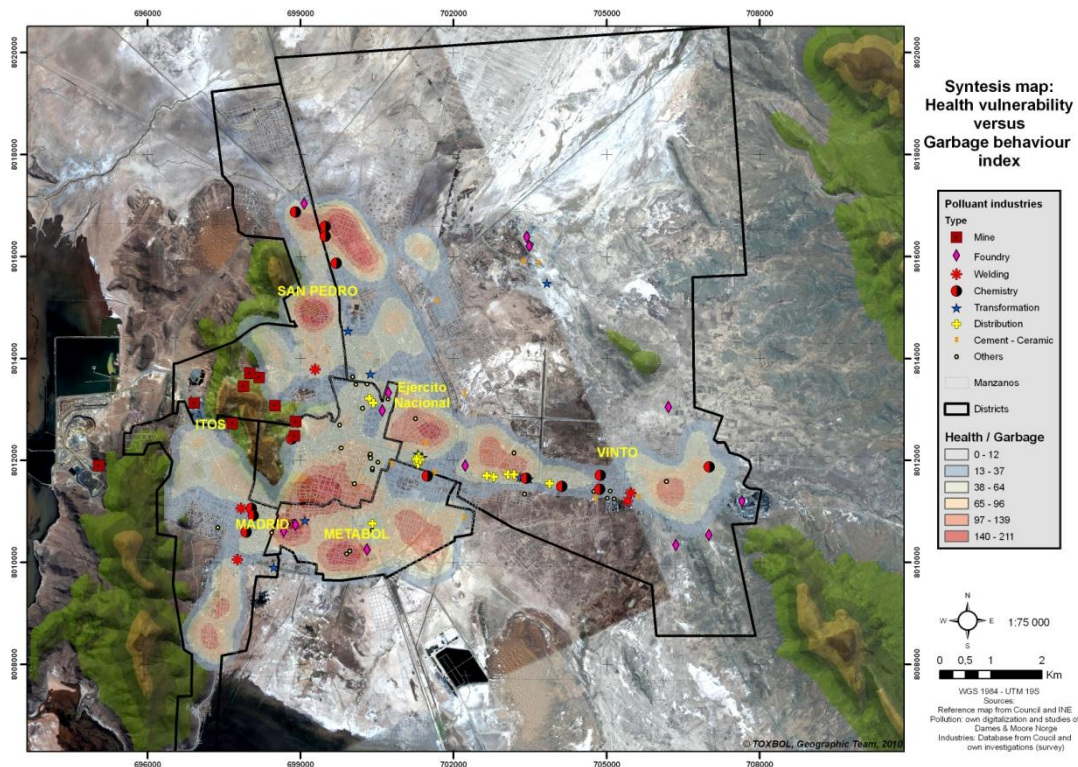
En ce qui concerne **le premier point**, il est important de souligner que, dans le cas d'une enquête en particulier, il est impératif d'ajuster le plan d'échantillonnage à l'objectif de l'étude spatiale. Dans le cas qui nous préoccupe, nous ne cherchons pas à effectuer des estimations de paramètres (nombre de malades, population la plus vulnérable, etc.) sinon à mettre en évidence des phénomènes spatialisés. Dans une zone urbaine souvent découpée en *cuadra*, ilots, zones censitaires, etc., un échantillonnage de type systématique est facile à mettre en œuvre et offre de multiples avantages, autant pour la représentation cartographique que pour les traitements d'analyse spatiale (interpolations en particulier). Lorsque l'on traite de phénomènes complexes, il est important d'avoir des méthodes et des plans d'échantillonnage très simples qui permettent une interprétation sans équivoque, pour éviter encore plus de complexité lors de l'interprétation.

Pour ce qui est **du second point**, il est important de considérer le caractère collectif et spatialisé de certains phénomènes. Dans le cas de l'épidémiologie, il importe peu d'établir des statistiques par maladie, classification et estimation qui seront toujours douteuses, sinon de mettre en évidence des quartiers ou des zones où se répètent ou se concentrent des phénomènes particuliers. L'utilisation de l'échantillonnage systématique est dans ce cas aussi un avantage certain.

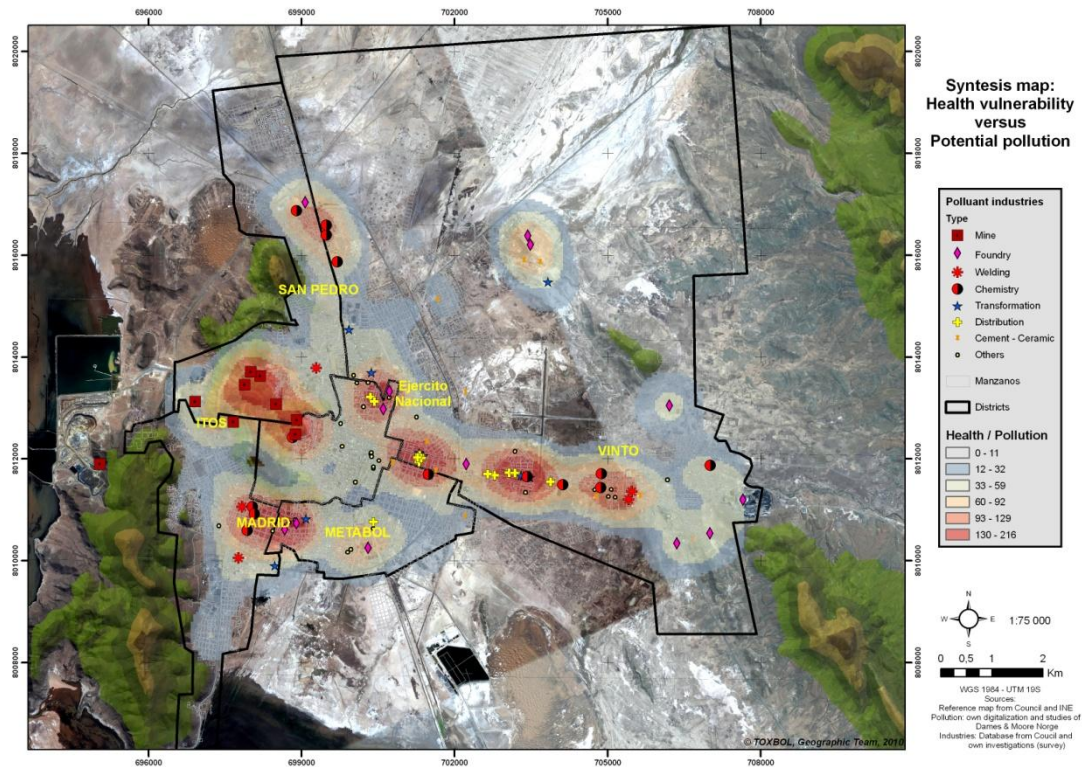
Le troisième point nous indique que l'interrelation entre les diverses sources d'information peut s'effectuer au moyen de la superposition de plans cartographiques, à condition qu'ils soient élaborés dans des conditions homogènes de méthodes. Dans ce cas, nous ne sommes pas intéressés par une relation de cause à effet ou une relation de corrélation sinon par la coïncidence spatiale de deux ou plusieurs variables qui nous renseigneront alors sur l'existence de phénomènes collectifs particuliers.

Dans notre cas, nous avons utilisé systématiquement une méthode de notation des variables, de façon à pouvoir comparer des variables de type quantitatives et qualitatives : note de 0 à 100, comparaison à la moyenne, classification ordinale, etc. Cette note est utilisée comme source pour le calcul de la densité, selon la technique de *point density* sous *Spatial Analysis* d'Arc Gis, qui a l'avantage d'être robuste et de mesurer une concentration en fonction d'une valeur et d'une distance, sans estimer de valeurs intermédiaires comme le font les méthodes d'interpolation. La modification de la classification ordinale ou de l'amplitude la note ne modifie pas significativement la représentation de la densité.

Cette méthode a été utilisée pour 7 couches différentes d'information : vulnérabilité sanitaire, de l'habitat, socio-économique, valeur de perception global des problèmes d'environnement, problèmes de santé, comportement relatif aux ordures ménagères, entreprises potentiellement polluantes. Les couches ont été combinées deux à deux pour mettre en évidence la superposition de problèmes et délimiter ainsi des zones de concentration de la vulnérabilité. Les couches peuvent être combinées de diverses manières : soit par construction d'image (chaque couche est introduite dans un canal de l'image RGB), soit par calcul (dans notre cas nous avons calculé un indice moyen de la façon suivante : $(\text{couche1} + \text{couche2})/2$), ou des indices plus complexes pondérés. A titre d'exemple est montrée sur les cartes 9 et 10 la combinaison entre trois synthèses : l'indice de vulnérabilité de santé, l'indice de comportement en relation aux ordures ménagères, et l'indice de pollution potentielle des industries. On remarque des différences très significatives entre les deux cartes qui nous permettent de dégager certaines conclusions sur l'influence de la pollution minière, dont voici quelques commentaires.



Carte 9 : la relation de coïncidence entre vulnérabilités liées à la santé et problèmes de comportement vis-à-vis des ordures ménagères



Carte 10 : la relation de coïncidence entre vulnérabilités liées à la santé et industries potentiellement polluantes

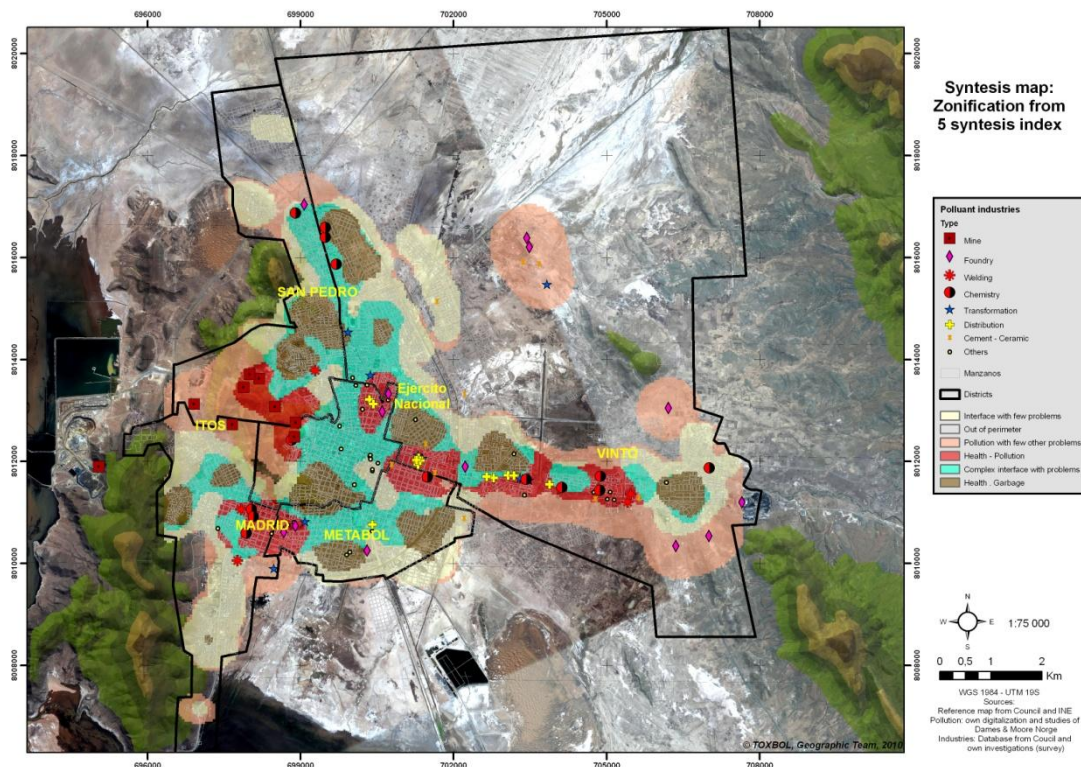
Le cas de Vinto (à l'Est de la ville) est sans doute le plus intéressant car la présence de la fonderie pourrait présumer d'une pollution et d'impacts locaux importants. On s'aperçoit cependant que la relation la plus importante est liée à la mauvaise gestion des ordures ménagères plus que de la fonderie, et que les problèmes de pollution se situent plus à l'ouest, autour des petites industries de transformation. On retrouve ainsi des zones où la coïncidence entre critères n'est pas aussi importante que l'on pourrait supposer, en particulier autour de la mine d'Itos, et de la zone industrielle.

Il existe également des quartiers qui semblent cumuler les vulnérabilités comme, à titre d'exemple, les quartiers de El Carmen, Villa Germania, ou l'avenue Ejercito Nacional ; problèmes liés principalement à la présence de nombreux *ingenios* au centre des quartiers, mais aussi à l'accumulation de nuisances : trafic automobile, ordures ménagères, eau stagnante sur des routes en terre, insalubrité de l'habitat, etc.

D'autres quartiers présentent des relations très spécifiques comme Madrid au Sud (pollution des industries chimiques et des passifs environnementaux), la zone minière ou Azurduy (problème exclusivement minier), San Pedro (problème des ordures ménagères), la ex.Metabol (curieusement plus pour le problème des ordures que pour le passif minier).

Finalement, au point de vue méthodologique, ces couches d'information de synthèse, ou les combinaisons entre ces couches peuvent être traitées au moyen d'une analyse multivariée, qui nous permet de zoner le territoire en fonction des dominantes de problème ou de vulnérabilité. La carte 11 montre le résultat d'une de ces analyses au moyen de 5 couches d'information (les couches « habitat » et « socio économique » ont été enlevées parce que redondantes avec la couche

«sanitaire »), en utilisant les méthodes du Spatial Analyst Tools / Multivariate / Iso Clusters, Principal components et Maximum Likelihood Class.



Carte 11: synthèse générale sur la base d'une combinaison de 5 critères de vulnérabilité, au moyen d'une analyse multivariée (IsoClusters).

Cette synthèse, qui sera combinée avec les résultats des autres disciplines, permet de hiérarchiser les problèmes pour l'élaboration de politiques de prévention ou d'aménagement du territoire. Elle pointe directement sur les zones problématiques, sans que nous en connaissions exactement les mécanismes, mais en montrant des concentrations spatiales de problèmes qui appellent à la réflexion. Elle nous montre aussi des concentrations typées ; par exemple on remarque l'importance des petites industries de transformation et de l'industrie chimique dans la génération de problèmes. Enfin, elle permet de relativiser un certain nombre de présupposés, largement réfutés d'ailleurs par les entretiens sur le terrain, en montrant que des zones que l'on supposerait problématiques, présentent peu de coïncidence avec d'autres phénomènes. C'est le cas d'ITOS, de la zone industrielle ou de Vinto, qui ne montrent pas la même intensité de problème que Madrid ou El Carmen par exemple.

Ces méthodologies sont extrêmement robustes, et des modifications dans le traitement des paramètres ne modifient pas sensiblement les résultats des coïncidences, ni des classifications. Par contre, cette méthode constitue une chaîne de traitement qui permet d'introduire, au fur et à mesure de l'état d'avancement du programme, de nouveaux paramètres et de tester de nouvelles hypothèses.

Conclusions

Il est important de signaler que le cadre théorique actuel sur le risque ne permet pas une modélisation formelle dans le cas des types de pollution que nous appelons « chronique ». La plupart des concepts et paramètres identifiés dans cette théorie ne s'applique pas à des phénomènes lents et continus et dont la relation cause – effet est complexe. Dans ce dernier cas, l'analyse multi critères est impérative et suppose alors des contraintes méthodologiques, du fait de la diversité des sources d'information mobilisées.

L'usage d'une référence spatiale est une de ces contraintes ; la simplicité et la robustesse des méthodes utilisées en est une autre. En effet, il est indispensable de ne pas surajouter, à des processus complexes, des méthodologies complexes. Les méthodes doivent permettre une interprétation sans équivoque des superpositions entre les critères. L'usage de méthodes d'interpolation, par exemple, suppose que l'on maîtrise la technique d'interpolation pour pouvoir expliquer ensuite l'intensité d'un élément toxique en un endroit donné et son interaction avec d'autres paramètres ; ce qui est rarement le cas.

Les recherches interdisciplinaires sont possibles autour d'une problématique commune qui permet de construire un dialogue. En général il est nécessaire également de disposer d'un objet ou d'une base commune de travail. La base spatiale est la plus pertinente dans les phénomènes socio-centrés où l'on cherche à mettre en évidence des processus collectifs et des relations de proximité. Cependant, cette base spatiale est utile lorsqu'elle est construite de manière homogène entre les disciplines travaillant sur un même projet. Dans ce cas, le SIG devient un outil puissant d'organisation et d'intégration des données d'origines diverses.

Il est donc impératif, au niveau méthodologique, que le recueil des informations permette de les rendre compatibles entre elles ; une référence commune ou un plan d'échantillonnage compatible favorisent cette intégration. Si cette condition est respectée, les SIG permettent alors de montrer des coïncidences spatiales entre critères, lesquelles ne sont pas des modèles statistiques formels, mais la représentation de concentrations de modèles de fonctionnement de la société.

Face au problème qui nous était posé, et à l'analyse que nous avons faites des éléments théoriques et méthodologiques sur la problématique du risque, nous avons construit une méthode, décrite dans cet article, qui combine plusieurs principes méthodologiques :

- Le choix de critères pertinents en fonction de la connaissance que nous avons des processus et mécanismes ;
- Le centrage de ces critères sur l'objectif de la recherche, et dans notre cas sur la société et le comportement de cette société ;
- La recherche d'une base commune de traitement spatial, soit au moyen d'un échantillonnage particulier (systématique) ou de méthodes d'analyse robustes et simples (densité et buffers) ;
- La recherche de situations de concentration et de similitude spatiales, évitant la relation de corrélation (ou de cause – effet), dans la mesure où nous ne connaissons pas les mécanismes ;

- L'élaboration de synthèses orientées vers la combinaison de critères et le test d'hypothèses ;
- Enfin, le caractère ouvert et graduel de la méthode, permettant d'insérer de nouveaux critères ou de nouvelles hypothèses sans modifier l'organisation complète de la méthodologie ou du traitement.

Cette méthode s'appuie fortement sur les SIG car ils constituent un outil qui permet une certaine rigueur dans l'usage des informations, et une certaine souplesse dans la combinaison des critères, du fait de la puissance des modules d'analyse spatiale qu'il intègre.

Nous proposons que soit testée cette méthode sur des types de risques similaires. Notre objectif est ainsi d'appliquer le même type de raisonnement sur l'analyse des impacts du changement climatique sur les écosystèmes et les pratiques des sociétés traditionnelles. En effet, les relations de cause à effet dans ce cas sont également complexes et font appel à des perceptions liées au modèle de vie de la société, à des comportements liés aux transformations sociales, à la globalisation économique ou culturelle, et à des pratiques qui évoluent sur des périodes de temps long. L'analyse des critères de base et de la coïncidence spatiale entre ces critères peut nous permettre de comprendre la part relative de chaque élément et la part spécifique du facteur perturbant.

Bibliographie

Abt E., J. V. Rodricks, J. I. Levy, L. Zeise & T. A. Burke, 2010. Science and decisions: advancing risk assessment. *Risk Analysis* 30(7): 1028-1036.

Almaraz S., 1998. *El poder y la caída. El estaño en la historia de Bolivia*. La Paz: Amigos del Libro, 6ta ed..

Arreghini L. & H. Mazurek, 2004. Territoire, risque et mondialisation: quelques réflexions à partir du cas Andin. *Xème Journées de Géographie Tropicale (Orléans, 24, 25, 26 septembre 2003). Espaces Tropicaux et Risques. Du local au global*. G. David. Orléans: Presses Universitaires d'Orléans, IRD., 240-260p.

Bailly A. (dir.), Eds., 1996. *Risques naturels, risques de société*. Paris: Economica, 103p.

Balkau F., 1993. Pollution prevention and abatement guidelines for the mining industry. Paris: UNEP IE/PAC, the World Bank. 2nd draft: 19p.

Becerra S., A. Peltier (dir.), 2009. *Risques et environnement: recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*. Paris: L'Harmattan, 576p.

Beck U., 2002. *La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité*. Paris: Aubier, coll. Alto, 400p.

Bouyssou J., 1997. *Théorie générale du risque*. Paris: Economica, 146p.

Brockband B., J. Cohrsson & V. T. Covello, 1991. The risk assessment manual: a guide to understanding and using health and environmental assessment. Washington: Council on Environmental Quality. NTIS n° PB89-137772KNKp.

Covello V. & P. M. Sandman, 2001. Risk communication: evolution and revolution. *Solutions to an environment in peril*. A. Wolbarst. Baltimore: John Hopkins University Press, 164-178p.

d'Ercole R., S. Hardy, P. Metzger & J. Robert (Eds.), 2009. *Vulnerabilidades urbanas en los países andinos (Bolivia, Ecuador, Perú)*. Lima: Institut français d'études andines - IFEA; CNRS; IRD; COOPI; Comisión Europea. Bulletin de l'Institut français d'études andines. N° temático 38(3), 401-976p.

d'Ercole R., J. C. Thouret, O. Dollfus & J. P. Asté, 1994. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine* 82(4): 87-96.

Dames & Moore N., 2002. Estudio de evaluación de impacto ambiental. Capítulo 4. Diagnóstico de línea base de factores físicos y bióticos y mina San José. Oruro: Cooperación Minera de Bolivia. 4: 105p.

Dauphiné A., 2003. *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Paris: Armand Colin, 288p.

Frontier S. (Ed.), 1982. *Stratégies d'échantillonnage en écologie*. Paris, Laval: Masson, Presses Universitaire du Québec, 494p.

Gilbert C., 2009. La vulnérabilité: une notion vulnérable? A propos des risques naturels. *Risques et environnement: recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*. S. Becerra&A. Peltier. Paris: L'Harmattan, 23-40p.

Haimès Y. Y., 2009a. On the complex definition of Risk: a systems-based approach. *Risk Analysis* 29(12): 1647-1654.

Haimès Y. Y., 2009b. On the definition of resilience in systems. *Risk Analysis* 29(4): 498-501.

Hampel J., 2006. Different concepts of risk – A challenge for risk communication. *International Journal of Medical Microbiology* 296(1).

Hovden J., 2003. Theory formations related to the "Risk Society". *NoFS XV 2003*. Karlstad, Sweden: 12p.

Jorland G., 1993. Principe de raison suffisante et théorie classique des probabilités *Les Cahiers du Centre de Recherches Historiques* 11: <http://ccrh.revues.org/index2772.html>.

Langford I. H., 2002. An existential approach to risk perception. *Risk Analysis* 22(1): 101-120.

Lemkow L., 2002. *Sociología ambiental. Pensamiento socioambiental y ecología social del riesgo*. Barcelona: Icaria, 232p.

Loayza F. & I. Franco, 2001. *Dinámica del cluster minero Oruro en un contexto de crisis*. Santiago de Chile: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, CEPAL – ECLAC.

Márquez C. G., 2001. Producción de plata y comercio en Oruro a fines del periodo colonial. Análisis a través de las fuentes fiscales. *Revista de Indias* LXI(222): 377-405.

Maskrey A. c., 1993. *Los desastres "no" son naturales*. Bogota: La Red, ITDG, 138p.

Mazurek H., D. F. Pereira, H. L. V. Rojas & J. Q. Centellas, 2010. *Vulnerabilidad social a la luz del estudio de la contaminación en Oruro (Bolivia)*. Marseille: IRD, ANR: 208p.

Michard J., 2008. *Cooperativas mineras en Bolivia. Formas de organización, producción y comercialización*. Cochabamba: CEDIB, 82p.

Möeller H. S., E. L. Trujillo, N. P. Soria & Y. P. Soria, 2002. *Dinamitas y contaminantes. Cooperativas mineras y su incidencia en la problemática ambiental*. La Paz: Fundación PIEB, 158p.

Péguy C.-P., 1995. Les risques naturels majeurs. *Encyclopédie de Géographie*. A. Bailly, R. Ferras & D. Pumain. Paris: Economica, 919-930p.

Peretti-Watel P., 2001. *La société du risque*. Paris: La Découverte, 128p.

Renn O., 1998. The role of risk perception for risk management. *Reliability Engineering and System Safety* 59: 49-62.

Renn O., 2008. Concepts of risk: an interdisciplinary review. Part1: disciplinary risk concepts. *GAIA* 17/1: 50-66.

Renn O. & A. Klinke, 2004. Systemic risks: a new challenge for risk management. *EMBO reports* 5(Special Issue: Science & Society): 41-46.

Salem G., C. Marois, L. Arréghini & P. Waniez, 1992. Lieux de vie, densités et zones à risques: l'analyse spatiale au service de la santé à Pikine (Sénégal). *Séminfor5*. Paris: Colloques et Séminaires, ORSTOM, 419-430p.

Sjöberg L., 2000. Factors in risk perception. *Risk Analysis* 20(1): 1-11.

Slovic P., 2000. *The perception of risk*. London: Earthscan, 474p.

Thyrion P., 1967. Regards sur le développement récent de la théorie du risque. *ASTIN Bulletin – The Journal of the International Actuarial Association* 4(2): 87-105.

Velasco P., 2000. The mineral industry of Bolivia. *Minerals Yearbook*. U. G. Survey. New York: US Geological Survey, 31-38p.

Vertzberger Y. Y. I., 1995. Rethinking and reconceptualizing risk in foreign policy decision-making: a sociocognitive approach. *Political Psychology* 16(2): 347-380.