

Origine des pollutions polymétalliques et impact sur l'environnement, la santé et la société :

Etude dans une ville minière de l'Altiplano bolivien

ToxBol

Géochimie: Roulet M¹, Point D¹, Goix S¹, Tapia J¹, Audry S¹, Viers G¹, Oliva P¹, Polve M¹, Huyata C²

Chimie : Duprey J-L³, De La Galvez E⁴, Herbas C⁵, Ugarte L⁴

Ecologie : Gibon F-M⁶, Moya N⁷, Molina C⁸, Ibáñez C⁸, Oberdorff T⁶,

Sciences humaines : Mazurek H⁹, Pereira D⁹, Rojas L², Centellas J⁹

Santé : Barbieri FL¹⁰, Ruiz M¹¹, Paco P¹⁰, Zambrana S¹², Ascarrunz M¹³, Tirado N¹³, Terceros P¹⁰, Casiot C¹⁴, Freydieier R¹⁴, Gardon J¹⁴.

Résumé

Depuis des siècles, l'exploitation minière est au centre de l'activité économique et industrielle des pays andins. Des villes se sont développées au contact immédiat des mines les plus importantes, comme Oruro, objet de l'étude, situé sur l'Altiplano bolivien à 3700 mètres d'altitude. Dans cette ville, 220 000 personnes vivent dans un environnement contaminé par des éléments traces toxiques comme le plomb, l'arsenic ou le cadmium, résidus de l'exploitation des gisements d'argent, d'étain ou de zinc. L'impact environnemental, social et sanitaire de cette situation est préoccupant, mais n'avait jamais été étudié.

Le programme ToxBol avait pour objectif d'étudier l'origine et l'impact écologique, sanitaire et social des pollutions polymétalliques dans cette ville minière. Ce projet de recherche pluridisciplinaire a réuni des géochimistes, des écologues, des épidémiologistes, des géographes et des sociologues travaillant sur le même espace géographique.

Dans la ville, tous les compartiments de l'environnement ont été étudiés lors de campagnes d'échantillonnage d'eaux, de sols, de poussières et d'aérosols en veillant à obtenir une bonne représentativité spatiale. Au Sud de la ville, les géochimistes et les écologues ont étudié le devenir des éléments traces métalliques dans l'environnement et les réseaux trophiques du Lac Uru Uru qui reçoit les drainages acides produits par les activités minières.

Les études épidémiologiques ont porté sur la caractérisation de l'exposition humaine par l'analyse de différentes matrices biologiques et sur l'étude de l'impact de l'exposition aux métaux pendant la grossesse sur l'immunité et le développement neurologique du nourrisson.

Une enquête auprès des familles et des approches spatiales ciblées ont permis aux géographes et aux sociologues d'étudier la perception de la population et les phénomènes d'adaptations développés face à cette situation.

Les résultats confirment une forte contamination de l'environnement, notamment par de l'arsenic, de l'antimoine, du cadmium, de l'étain et du plomb. Les concentrations les plus élevées sont retrouvées à proximité des zones de fonderie, où les aérosols sont fortement enrichis en éléments métalliques toxiques pour l'homme (Cd, As, Sb). Le reste de la ville apparaît également contaminé par certains éléments métalliques, mais de façon très hétérogène, sans que l'on puisse dégager une organisation spatiale précise. L'eau de consommation humaine fournie par le réseau urbain apparaît de bonne qualité

¹ IRD LMTG, Toulouse (david.point@lmtg.obs-mip.fr)

² IRD Bolivia (bolivie@ird.fr)

³ IRD IMAGO, Bolivie (jean-louis.duprey@ird.fr)

⁴ UMSA LCA, Bolivie

⁵ UMSA IGMA, Bolivie (herbas.c@gmail.com)

⁶ IRD BOREA, Paris (francois-marie.gibon@ird.fr)

⁷ UMSS ULRA, Bolivie (nabor.moya@gmail.com)

⁸ UMSA IE, Bolivie (camoar6088@gmail.com)

⁹ IRD LPED, Marseille (hubert.mazurek@ird.fr)

¹⁰ UMSA SELADIS, Bolivie (sperezlara@yahoo.com)

¹¹ CREAL UPF, Barcelone (m.ruizcastell@gmail.com)

¹² UMSA IBMB, Bolivie (genetoxbolivia@gmail.com)

¹³ UMSA IGH, Bolivie (sil_zambrana@yahoo.es)

¹⁴ IRD HSM, France (jacques.gardon@ird.fr)

chimique, en dehors d'une commune adjacente de la ville d'Oruro où des teneurs élevées ont été retrouvées en antimoine et en arsenic.

Les métaux sont présents à des concentrations élevées dans les sédiments du lac Uru Uru situé au Sud de la ville. Certains de ces métaux sont assimilés et concentrés dans les réseaux trophiques comme le mercure et dans une moindre mesure le cadmium, le zinc et le cuivre. A l'inverse, l'arsenic, le plomb et l'étain concentrés dans les invertébrés ne sont que peu retrouvés chez les prédateurs. La biodiversité des rivières du bassin versant et l'étude des conditions physico-chimiques ont permis de mettre au point un indicateur d'intégrité biologique qui permet de décrire l'impact de ces pollutions sur la qualité des eaux de surface.

Chez les enfants d'âge scolaire, on observe une forte différence d'exposition entre les quartiers industriels et les quartiers distants des installations minières. Cette différence n'apparaît pas chez les femmes enceintes dont l'exposition est liée essentiellement à des problèmes de comportement au sein du foyer. L'introduction dans le domicile de matériel ou d'outils en provenance de la mine est retrouvée dans la majorité des cas de surexposition au plomb observés chez les femmes enceintes qui participaient à l'étude.

L'étude de l'immunité à la naissance apporte des éléments en faveur d'un effet pro-inflammatoire de l'exposition à ce cocktail métallique par l'étude des proliférations lymphocytaires et par le dosage de certaines cytokines. Chez le nourrisson, au cours du premier mois, quelques symptômes mineurs évalués au moyen de l'échelle de Brazelton semblent associés au niveau d'exposition de la mère pendant la grossesse. Par contre, à un an, le développement des enfants évalués par l'échelle de Bayley apparaît sensiblement normal.

Pour les sociologues, la ville s'est structurée autour d'une identité de ville minière, ce qui lui confère une grande tolérance à cette situation. De plus, la dispersion des sources, la multiplicité des voies d'exposition et l'absence d'effet sanitaire visible compliquent considérablement la perception du risque et ainsi la possibilité de prioriser ce risque dans les politiques publiques. Les concepts d'aléa, risque et vulnérabilité font l'objet d'une réflexion théorique pour être adaptés à la description de ce contexte d'exposition chronique.

Abstract

For centuries, mining activities have driven the economical growth of most Andean countries. Several cities have grown over time in direct contact with mines. Oruro, a typical mining city of the Bolivian Altiplano region at 3,700 meters above sea level was investigated in this work. In this city, 220,000 people live in an urban environment contaminated by several toxic trace elements such as lead, arsenic and cadmium resulting from the exploitation silver, tin or zinc deposits. The environmental, social and health situation in the case of a polymetallic mining context is worrying, but had never been studied so far.

The ToxBol program aimed to study the origin and the impact of polymetallic mining contaminants to the environment, health and the social organization in this mining city. This multidisciplinary research project brought together geochemists, ecologists, epidemiologists, geographers and sociologists working on the same geographical space.

In the city, all environmental compartments (water, soil, dust and aerosols) have been investigated at high spatial resolution during several sampling campaigns. South of the city, geochemists and ecologists have studied the reactivity and fate of trace metals in the environment and food webs of Lake Uru-Uru receiving acidic mining drainages.

The epidemiological survey has focused on the characterization of human exposure through analysis of various biological matrices and the study of the impact of metal exposure during pregnancy on the immune and neurological development of infants.

A survey of families combined with spatial approaches was used by geographers and sociologists to study the public perception and the social adaptations developed to face this situation.

The geochemical results revealed the occurrence of three distinct sources of trace elements in aerosols and soils: (i) an elevated background source resulting from the erosion of minerals originating from volcanic rocks, (ii) a sedimentary source originating from large evaporative lake areas in the south, and (iii) a significant anthropogenic source for several metals (As, Sb, Cd, Sn, Pb) present in high concentrations and in fine particles near the smelting area of Vinto, located in the western part of the city. Trace metals in aerosols appear to be one of the main sources of contamination for human exposure, particularly in the smelting sector of the city. Water for human consumption provided by the urban network appears in good chemical quality, outside a town adjoining the city of Oruro, where high levels were found in antimony and arsenic.

Metals are present in high concentrations in the sediments of Lake Uru Uru located south of the city. Some of these metals, mainly originating from sediments are taken up and concentrated in food webs, such as

mercury and to a lesser extent cadmium, zinc and copper. Conversely, arsenic, lead and tin concentrate in invertebrates compared to predators. The biodiversity of rivers in the watershed and the study of physicochemical conditions helped to develop a region-specific indicator of biological integrity for describing the impact of pollution on the quality of surface waters.

In children, there was a marked difference in exposure between the industrial areas and remote areas of mining facilities. This difference was not observed in pregnant women whose exposure is mainly related to social considerations at home. The introduction at home of equipment or tools from the mine was found to be one of the main factors leading to an overexposure to lead.

The study of immunity at birth showed evidence of proinflammatory effects of exposure to this metal cocktail considering lymphocyte proliferation and measurements of specific cytokines. In infants during the first month, a few minor symptoms assessed with the Brazelton scale were found to be associated with exposure of the mother during pregnancy. After one year, the development of children assessed by the Bayley scale appears substantially normal.

For sociologists, the city was structured around the identity to the mining sector, giving a high tolerance for the population to this situation. Moreover, the dispersion of sources, multiple routes of exposure and lack of visible health effects greatly complicated the perception of risk and the opportunity to prioritize this risk in public policy. The concepts of hazard, risk and vulnerability are the subject of theoretical reflection to be adapted to the description of the context of chronic exposure.

Introduction

La Cordillère des Andes concentre d'innombrables gisements métalliques dont certains sont exploités depuis l'aire précolombienne. Dans bien des cas, l'exploitation de ces filons s'est accompagnée de l'expansion de grandes villes à proximité immédiate des ouvertures de galeries.

Sur l'Altiplano bolivien, à 3700 mètres d'altitude, la ville d'Oruro est représentative de cette situation^{1,2}. Dans cette ville fondée en 1606 par les Espagnols, la richesse des gisements d'argent attira immédiatement une population nombreuse et Oruro comptait déjà 80 000 habitants en 1680, ce qui en faisait une des plus grandes villes du continent. Aujourd'hui, 220 000 habitants vivent dans cette agglomération au contact immédiat de nombreuses sources de pollutions métalliques, historiques comme contemporaines. Depuis cette époque, les gisements polymétalliques ont été exploités de façon industrielle pour leurs fortes concentrations en argent, étain, antimoine, plomb, bismuth...

Sur l'altiplano, l'eau est perçue comme une ressource précieuse et fragile. La région est aride avec une pluviométrie inférieure à 400 mm/an³. Elle est cependant relativement peuplée, notamment du fait des activités minières; il y a, en conséquence, une pression humaine forte sur les ressources en eau et sur les milieux aquatiques. Par ailleurs, le système TDPS (ensemble des bassins versant du lac Titicaca, du Desaguadero du lac Poopó et des salars) est endoréique; le lac Poopó est la zone humide la plus basse, il est actuellement sans exutoire et accumule donc les apports de métaux provenant de l'ensemble du bassin. Ces apports sont considérables (une étude récente estime les apports journaliers de métaux lourds au lac Poopó à plus de 800 Kg d'As, 40Kg de Cd et 60 Kg de Pb⁴), mais leur réactivité dans le système lacustre, leur séquestration/remobilisation dans les sédiments et leur éventuelle biodisponibilité ne sont pas connues.

Les déchets miniers se sont accumulés sur les collines au centre de la ville et représentent aujourd'hui des milliers de tonnes de stériles riches en sulfures métalliques. Les drainages acides générés par l'infiltration des eaux de pluie constituent une source rémanente de pollution. La ville renferme également de nombreuses friches industrielles de fonderies abandonnées ou d'usines de concentration de minerais fortement contaminées. Par ailleurs, les activités minières, minéralurgiques et métallurgiques sont toujours très intenses dans la ville et sa proche banlieue. L'extraction conduit les mineurs à produire d'importantes quantités d'eaux acides polluées par des métaux, notamment par le pompage des galeries profondes situées en dessous du niveau des nappes. Ces eaux acides représentent des centaines de mètres cubes par jour qui sont rejetées sans traitement, directement dans l'environnement. Les usines de concentrations et les fonderies, artisanales comme industrielles, sont également nombreuses et participent à la pollution atmosphérique.

En 1995, un rapport d'expertise⁵ a décrit pour la première fois de façon détaillée les pollutions minières rencontrées dans le département d'Oruro. Ce rapport portait plus sur les campements miniers situés en zone rurale que sur la ville elle-même, mais quelques prélèvements de sol et d'eau montraient des niveaux très élevés d'arsenic, de plomb, de cadmium, d'antimoine en périphérie urbaine. Les activités extractives et la transformation des métaux sont très polluantes et exposent les populations à des éléments métalliques toxiques, comme l'arsenic, le plomb ou le cadmium⁶. Au Pérou, dans les villes minières de la Oroya⁷ ou à Cerro de Pasco⁸, des études récentes révèlent une exposition massive des populations avec une forte prévalence de saturnisme infantile. Même très longtemps après l'arrêt des activités minières, l'existence d'une contamination par le plomb est susceptible d'exposer les populations à un risque sanitaire^{9,10,11}.

Dans le contexte d'Oruro, très peu d'informations sont disponibles sur les conséquences de ces pollutions polymétalliques¹². Le projet ToxBol a pour objectif de décrire l'origine et l'impact de ces pollutions sur l'environnement, la santé et la société. Il réunit des géochimistes, des écologues, des médecins, des épidémiologistes, des géographes et des sociologues pour permettre d'aborder cette situation complexe tant sur le plan environnemental que sur le plan sanitaire et social. Ce projet avait de plus pour ambition de consolider l'approche systémique des problèmes « environnement et santé » tout en renforçant les partenariats existants entre les chercheurs de l'IRD et des Universités partenaires boliviennes.

Matériels et méthodes

Géochimie

Le volet géochimie des sédiments lacustres a porté sur l'étude de l'influence de l'activité minière sur les lagunes d'altitude de cette région, en particulier le lac Uru-Uru (5 km au Sud d'Oruro). Deux campagnes d'échantillonnage réalisées en saison sèche et humide ont permis d'obtenir 5 carottes sédimentaires : 4 dans le lac Uru-Uru et 1 dans une lagune de référence, exempte d'activités extractrices (Cordillère Est) pour déterminer le bruit de fond géochimique de la région. Les sédiments ont fait l'objet d'une

caractérisation minéralogique détaillée (DRX, MEB, microsonde) et de digestions totales et sélectives (ICP-MS) pour déterminer la mobilité et la biodisponibilité potentielles des éléments traces métalliques (ETM) et métalloïdes. Les sédiments ont également été datés (^{210}Pb , ^{137}Cs) pour relier les variations de concentrations enregistrées dans les sédiments à l'historique connu des activités minières et de fonderie dans la région.

Le volet de géochimie des contaminants métalliques en milieu urbain a porté sur le prélèvement et l'analyse systématique des concentrations de plus de 23 éléments (Na, Mg, Al, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba, W, Pb et U) dans les compartiments sols, poussières, air (aérosols) et eau de consommation suivant le même espace géographique avec une résolution suffisante pour obtenir une bonne description spatiale des différents quartiers de la ville d'Oruro. L'échantillonnage a été renforcé autour des zones sources potentielles de contamination répertoriées par de l'équipe sciences sociales. Les échantillons d'aérosols ont été collectés à l'aide d'un préleveur atmosphérique dichotomique (PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$) déployé durant 24h (8m^3) en différents points de la ville en saison sèche. Les échantillons de sols, poussières et d'aérosols ont fait l'objet d'une caractérisation minéralogique détaillée (DRX, MEB) et de digestions totales avant analyse par ICP-MS.

Ecologie

La priorité a été donnée à l'étude des écosystèmes aquatiques de surface suivant deux objectifs : (i) le premier concernait les cours d'eau, et visait à mettre au point un indice de qualité biologique destiné à évaluer l'impact des activités humaines et en particulier de l'activité minière et de la pollution induite; (ii) le second concernait le lac Uru-Uru, visait à établir un premier modèle du fonctionnement trophique et à mettre en évidence d'éventuelles biomagnifications.

Nous avons développé et validé un Indice d'Intégrité Biologique à partir d'une étude écologique et biologique de 66 cours d'eau situés dans le département d'Oruro et répartis en fonction d'un gradient d'impact anthropogénique. L'indice a été élaboré sur une base régionale en comparant les conditions locales. Le matériel biologique choisi a été les peuplements benthiques (macroinvertébrés), l'ichtyofaune locale est en effet trop pauvre pour constituer une alternative. Nous avons testé 45 métriques concernant la nature des taxons présents, mais également les traits biologiques et la structure trophique du peuplement. Pour quantifier l'écart aux conditions de référence, nous avons d'abord établi et validé des modèles statistiques décrivant les réponses des différentes métriques aux variations environnementales en l'absence de toute perturbation anthropogénique. Huit indicateurs ont été retenus pour définir l'indice final. Les bases de cet indice ont été développées récemment¹³, il a été utilisé en France à partir des peuplements de poissons¹⁴ et en Bolivie, dans le Chaparé, à partir des peuplements benthiques¹⁵.

L'étude du fonctionnement trophique du lac Uru-Uru a associé, pour les principaux composants faunistique et floristique, l'analyse des métaux lourds à celle des isotopes stables du carbone et de l'azote (C^{13} et N^{15}). L'ensemble des techniques (prélèvements et analyses statistiques) ont été utilisées récemment pour l'étude du mercure dans les plaines inondables de l'Amazonie bolivienne^{16,17}. Douze métaux ont été recherchés (*Laboratorio de calidad ambiental de l'UMSA*): As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb, Sn, Sr, Zn et Hg. Le matériel biologique incluait: périphyton, algues filamenteuses (*Cladophora*), macrophytes immergés (*Myriophyllum*) ou émergents (*Scirpus*), deux mollusques (un gastéropode - Planorbidae et un bivalve - Sphaeriidae), insectes aquatiques (un chironome - Diptera Chironominae, une punaise aquatique - Hemiptera Corixidae, deux odonates - Odonata Libellulidae et Odonata Zygoptera, un Crustacé amphipode (*Hyaella*), deux espèces de poissons (*Orestias aguassizi* et *O. luteus*), et trois espèces d'oiseaux (une foulque - *Fulica ardesiaca*, un grèbe - *Rollandia rolland* et un canard plongeur - *Oxyura jamaicensis*).

Enfin, l'équipe a participé aux recherches écologiques d'une étude coordonnée par l'Universidad Technica de Oruro sur le lac Poopo. Du fait de la salinité, le lac offre des peuplements plus pauvres que ceux du lac Uru-Uru. Une première série de campagnes sur un gradient Nord-Sud a permis l'échantillonnage des deux espèces de poissons présentes (*Orestias aguassizi* et *Odonthestes bonariensis*) et de leur principale ressource alimentaire, un Crustacé branchiopode (*Artemia cf. franciscana*).

Epidémiologie

Les études épidémiologiques ont porté sur la caractérisation de l'exposition humaine par l'analyse de différentes matrices biologiques et sur l'étude de l'impact de l'exposition aux métaux pendant la grossesse sur l'immunité et le développement neurologique du nourrisson.

Pour apprécier la variabilité spatiale de l'exposition de la population, nous avons choisi dans un premier temps un biomarqueur indirect en mesurant la concentration d'éléments traces dans les cheveux (Pb, As, Sb, Cd, Sn, M, Zn, Cu, Co). Nous avons choisi 5 écoles primaires, en situations contrastées par rapport aux industries minières. Nous avons considéré que les enfants de 7-10 ans, qui ne sont pas impliqués dans

l'activité minière, pouvaient représenter une bonne « image » de l'exposition de la population générale, en dehors de toute exposition professionnelle à risque.

Par la suite, nous avons suivi une cohorte mères-enfants depuis le deuxième trimestre de grossesse jusqu'au premier anniversaire de l'enfant. La vie intra-utérine est considérée comme une période de grande vulnérabilité ayant un fort impact sur le développement futur de l'enfant. L'exposition de la mère pendant la grossesse a été mesurée sur du sang veineux prélevé lors d'une des consultations prénatales. A la naissance de l'enfant, des prélèvements de sang du cordon ont permis de renouveler la mesure de l'exposition. Après 5 mois de suivi de l'enfant, l'exposition de la mère a été à nouveau évaluée sur des prélèvements de cheveux. Après lyophilisation et digestion acide, le dosage des éléments traces métalliques dans le sang et les cheveux a été réalisé en ICP-MS. Grâce à cette analyse, nous disposons de plusieurs éléments traces métalliques, mais notre centre d'intérêt porte sur l'arsenic, le plomb, le cadmium et l'antimoine du fait de leur potentiel toxique pour l'homme. Enfin, des analyses des concentrations urinaires ont été réalisées spécifiquement pour la recherche d'arsenic et de cadmium.

A la naissance, nous avons évalué l'immunité innée de l'enfant par des études de proliférations lymphocytaires sur du sang du cordon. Plusieurs cytokines ont été dosées pour rechercher une influence de l'exposition aux éléments traces pendant la grossesse sur l'orientation du système immunitaire (IL-2, IL-4, IL-6, IFN- γ , TNF- α) à la naissance. Les sous-populations lymphocytaires ont également été étudiées.

Le développement neurologique du nourrisson a été étudié tout au long de la première année avec une évaluation précoce par l'échelle de Brazelton (NBAS) et à un an par l'échelle de Bayley.

Tout au long de cette première année, les enfants ont été suivis régulièrement pour connaître l'incidence des différents événements morbides.

Géographie et Sociologie

La méthodologie utilisée par l'équipe Sciences sociales s'est organisée autour de quatre éléments:

- L'assemblage d'un SIG autour de données de base fournies par les différentes institutions publiques ou de recherches :

- Modèle numérique de terrain à 20m à partir des cartes de l'Institut Géographique Militaire et du DEM de l'USGS ;

- Couches de base nécessaires à la compréhension de l'organisation spatiale : hydrologie, réseaux de communication, localisations des services, etc. ;

- Géo-référencement en système WSG84, UTM19S d'images satellitaires (Landsat et mosaïque Google) et de l'ensemble des informations géographiques;

- 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 ;

- 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 (cuadra), pour le calcul de la vulnérabilité socio démographique ;

- La réalisation d'une enquête auprès de 1700 familles (4600 individus) pour le traitement des informations de perception, de comportement et de vulnérabilité sanitaire.

L'objectif de ce travail est de comprendre les paramètres du risque liés aux pollutions polymétalliques, afin d'en dégager des éléments de politiques de prévention ou d'intervention. Cependant, l'analyse du risque de pollution minière, du fait de son caractère permanent et diffus, ne peut suivre la théorie classique et en particulier pose trois problèmes : l'effet, la cause et la représentation.

L'effet : 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 dans ce contexte d'exposition chronique à faibles doses; 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 nombreuses et 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 mesurable 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 coïncidence spatiale 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 (et en particulier une accumulation de problèmes), 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.

Résultats

Géochimie

Réactivité des contaminants miniers dans les écosystèmes lacustres

En dépit du fait que le département d'Oruro est impacté depuis le XVIIIème siècle par des activités minières et de fonderies très polluantes, très peu de connaissances scientifiques étaient disponibles concernant les caractéristiques géochimiques et les processus de transformation et de dispersion des éléments traces métalliques et métalloïdes dans les lacs d'altitude de cette région. Ces lacs sont particulièrement vulnérables du fait d'une productivité biologique et biodiversité importante qui structure une partie du tissu socioéconomique des communautés natives de cette région. La combinaison des approches statistiques, de système d'information géographique (SIG) et de facteurs d'enrichissement a permis de proposer un bruit de fond géochimique réaliste pour cette région fortement minéralisée et de déterminer les différentes sources d'éléments traces métalliques (ETM) et métalloïdes. Il apparaît que l'arsenic et l'antimoine constituent les deux éléments les plus enrichis naturellement dans cette région¹⁸.

Durant le dernier siècle, le taux d'accumulation des ETM et métalloïdes est principalement relié aux fluctuations des prix internationaux de Sn-Ag. L'impact anthropogénique indique que les sédiments du lac Uru-Uru sont majoritairement influencés par les apports d'origine minière. Le diagnostic de la mobilité potentielle des ETM et métalloïdes fait apparaître que les éléments les plus mobiles sont Cd>Mn>Mo>As>Sb>U car étant associés principalement aux fractions 'échangeable' et 'réductible' du sédiment. La présence de sulfures authigéniques (pyrite framboïdale riche en As) suggère une forte redistribution post-dépôt des ETM et métalloïdes due aux processus redox de la minéralisation de la matière organique (diagenèse précoce) indiquant un couplage fort des polluants miniers au cycle du carbone et aux conditions d'oxygène, faibles à très haute altitude (3700 m). Ces processus, par destruction des phases porteuses originelles, provoquent la solubilisation des ETM et métalloïdes qui se traduit par des flux diffusifs directs de polluants métalliques du sédiment vers la colonne d'eau. D'une façon générale, l'historique des activités minières couplé aux caractéristiques géologiques particulières de cette région a provoqué l'enrichissement en ETM et métalloïdes dans les sédiments du lac Uru-Uru. La présence de phases sulfurées authigéniques et les processus de remobilisation post-dépôt indiquent que la séquestration des ETM et métalloïdes dans les sédiments de ce lac ne peut être considérée comme pérenne, car soumise aux conditions climatiques typiques de cette région de haute altitude (précipitation/évaporation), et à leurs variations de forte amplitude à l'échelle journalière et saisonnière.

Dynamique et transport des contaminants miniers dans les environnements urbains

L'analyse de la contamination dans les différents compartiments environnementaux de la ville d'Oruro a permis de montrer que l'eau de consommation humaine fournie par le réseau urbain apparaît de relativement bonne qualité, en dehors d'une commune adjacente de la ville d'Oruro (Vinto) où des teneurs élevées ont été retrouvées en antimoine et en arsenic. Cette agglomération de 30000 habitants regroupe 5 fonderies, dont la plus importante fonderie d'étain de Bolivie. L'analyse minéralogique des sols et poussières de sols montre une forte similarité avec des phases minérales porteuses soufrées identiques (PbS, ZnS, ..) qui indique une origine commune. L'analyse géochimique des échantillons montre une absence de relation entre la granulométrie des sols et poussières de sols et les niveaux de contamination suggérant d'autres processus à l'origine du transport et du transfert des contaminants miniers en milieu urbain (transport éolien, remaniements anthropiques, trafic automobile, ...). L'analyse spatiale des facteurs d'enrichissement dans les poussières de sols montre une situation fortement polarisée entre les différents districts de la ville d'Oruro d'une part et la localité de Vinto d'autre part qui présente un enrichissement anthropique local significatif en As, Cd, Sn, Sb, W et Pb dans les sols et poussières de sols. Bien que les fonderies de Vinto exploitent essentiellement l'Sn et l'Sb, les autres éléments (As, Cd, W et Pb) y sont communément associés. Ces informations suggèrent clairement que l'activité de fonderie représente la source la plus importante de polluants métalliques pour l'environnement et la population à l'échelle de la ville d'Oruro, et que les autres activités industrielles, y compris les activités d'extraction minières, semblent contribuer de façon plus marginale.

L'analyse spatiale des polluants métalliques mesurés dans les particules atmosphériques pour les classe PM₁₀ et PM_{2,5} (fractions respirables) confirme clairement la tendance observée dans les sols et poussières

de sols avec une bipolarisation marquée entre la ville d'Oruro et la zone de fonderie de Vinto. La combinaison d'approches statistiques novatrices intégrant la distribution spatiale des données couplée à la détermination des facteurs d'enrichissement corrigés du bruit de fond naturel élevé montre clairement que 3 sources principales sont à l'origine des éléments mesurés dans les aérosols : une première source naturelle issue de la fragmentation et de l'érosion de minéraux d'origine magmatique (Na, K, Mn, Fe, Co, Rb, Cs, U) provenant du dôme volcanique au centre de la ville, une deuxième source naturelle d'origine sédimentaire caractérisée par des éléments alcalino-terreux (Mg, Ca, Sr, Ba) en particulier dans le Sud de la ville à proximité du lac Uru-Uru où de grandes zones d'évaporation carbonatées sont concentrées, enfin une troisième source anthropique est clairement mise en évidence (As, Cd, Sb, Cu, Zn et Pb) principalement centrée autour de la zone des fonderies de Vinto. La répartition des polluants métalliques dans les différentes classes de particules indique clairement un spectre unique inversé dans la zone de Vinto caractérisé par des concentrations extrêmement fortes, particulièrement enrichies dans la fraction la plus fine (PM_{2,5}) qui se traduit par un risque accru pour la Santé [Goix et al. Soumis cf. page 13].

Ecologie

Indice d'intégrité biologique des cours d'eau

L'étude des cours d'eau du département d'Oruro a permis la mise en évidence d'un impact brutal des activités minières sur la faune invertébrée benthique et, en conséquence, un fort contraste entre la qualité biologique des rivières des régions minières orientales et celle des rivières de référence (zones d'élevage extensif situées à l'Ouest du département et autour du Sajama). De façon à obtenir un indice opérationnel sur une région plus vaste, la base de données obtenue a été incorporée à une base de plus grande ampleur incluant 77 sites des vallées inter-andines et 56 sites du Piedmont andin. 45 métriques biologiques ont été testées. Après élimination de celles dont la distribution n'était pas normale, qui présentaient une faible réponse aux perturbations ou étaient fortement corrélées, 8 ont été retenues pour la mise au point de l'indice. 2 concernent la composition faunistique (nombre de familles présentes, nombre de familles appartenant aux ordres Ephéméroptères, Trichoptères et Plécoptères) ; 3 concernent les régimes trophiques (pourcentage d'invidus se nourrissant respectivement de sédiments, de fines particules détritiques, de microphytes) ; 2 concernent les densités (abondance totale et abondance des individus appartenant aux EPT) ; enfin une concerne la morphologie (pourcentage d'invidus présentant un aplatissement du corps). Cet indice multimétrique discrimine les sites de référence des sites perturbés et présente une réponse linéaire significative au gradient de perturbation. La diversité des métriques sur lesquelles il est bâti lui permet de réagir à des impacts de types variés et le fait d'être déconnecté de taxons précis permet son application dans au moins trois écorégions boliviennes aux caractéristiques géologiques et climatiques contrastées. Outil de diagnostic et de surveillance, il permet une évaluation sûre et rapide de l'état biologique des cours d'eau dans trois grandes écorégions qui représentent un peu moins de la moitié du territoire bolivien.

La contamination des lacs Poopó et Uru-Uru

Les recherches sur le lac Poopó ont été perturbées par les épisodes de sécheresse. Les densités de population aussi bien que les concentrations en divers métaux sont sujettes à de fortes variations en rapport avec ces variations hydriques. Le zinc est toujours présent à des concentrations très élevées. Chez les invertébrés (*Artemia*), elles sont généralement supérieures à 150 mg.kg⁻¹ (poids sec) ; à titre de comparaison, une concentration de 200 mg.kg⁻¹ est létale chez d'autres crustacés (Décapodes¹⁹). Le zinc, qui est une composante essentielle de nombreuses enzymes, est régulé chez beaucoup d'invertébrés. Chez les poissons, il reste le métal dominant, à des concentrations similaires ou un peu inférieures, ce qui confirme l'existence des processus de régulation chez *Orestias* et *Odontesthes*. L'arsenic vient en seconde position chez *Artemia* avec des taux qui dépassent souvent les 20 mg.kg⁻¹. En revanche, il est généralement en dessous de la limite de détection chez les poissons, sauf, mais de manière irrégulière, dans les viscères. Ceci confirme que, d'une part, l'arsenic se transfère dans les réseaux trophiques aquatiques aux niveaux inférieurs (invertébrés), d'autre part, une biodilution efficace apparaît aux niveaux supérieurs, en particulier chez les poissons. Le mercure est un problème sérieux avec un facteur de biomagnification (entre invertébrés et poissons) qui varie peu autour de 8, ce qui indique l'existence d'une forte méthylation dans le milieu. Le poisson présente des teneurs de l'ordre de 0,2 mg.kg⁻¹ qui, bien qu'élevées, sont acceptables pour une consommation occasionnelle. De ce point de vue, l'absence de niveau trophique supérieur (i. e. l'absence de grand prédateur) est un facteur favorable. Le cadmium est le métal le plus préoccupant. Chez *Artemia*, les teneurs sont de l'ordre de quelques dixièmes de mg par kg, mais des valeurs de 4 mg.kg⁻¹ ont été notées. Le facteur de biomagnification (entre invertébrés et poissons) est proche de 2 chez *Odontesthes*, mais peut dépasser 15 chez *Orestias*. La biomagnification du cadmium dans les écosystèmes aquatiques est une question controversée, les études sur le terrain comme au laboratoire fournissent des résultats variables voire contradictoires. Son importance dépend

probablement des conditions du milieu ou des taxons considérés. Elle est incontestablement présente sur le lac Poopó, où, avec des concentrations qui se situent autour de 1 mg.kg^{-1} *Odontesthes* est un peu moins contaminé qu'*Orestias* (autour de 2 mg.kg^{-1}), leur consommation serait interdite dans l'Union Européenne. L'étude du lac Uru-Uru concerne des écosystèmes plus riches, elle inclut les analyses d'isotopes stables qui ne sont pas encore toutes disponibles et d'autres métaux notamment le plomb, l'étain et le cuivre. Les premières analyses confirment les résultats obtenus sur le Poopo, notamment la biodilution de l'arsenic, la biomagnification du mercure (et donc l'existence de la méthylation) et un risque cadmium à consommer les produits de la pêche.

Epidémiologie

Exposition des populations aux éléments traces toxiques

La mesure de l'exposition chez les enfants de 7 à 10 ans ($n=242$) montre une forte hétérogénéité entre les différents quartiers de la ville. La concentration en plomb dans les cheveux passe par exemple de $1.6 \mu\text{g/g}$ (SD 1.3) en milieu rural ou $2.3 \mu\text{g/g}$ (3.0) dans des quartiers situés loin des industries minières à respectivement $14.1 \mu\text{g/g}$ (2.7) et $21.2 \mu\text{g/g}$ (3.3) dans le quartier des mineurs et à proximité d'une grande fonderie. Cette différence, statistiquement très significative, est retrouvée pour plusieurs éléments traces potentiellement toxiques (As, Cd, Sb, Mn).

Contrairement aux observations réalisées chez les enfants, la forte polarisation spatiale, opposant des quartiers très exposés à des quartiers relativement protégés, n'a pas été observée chez les femmes enceintes ($n=413$). Les niveaux de contamination apparaissent globalement très bas et le ratio d'exposition qui allait de 1 à 10 chez les enfants n'est pas retrouvé ici. Par exemple, la plombémie moyenne est de $19.7 \mu\text{g/L}$ (SD 1.86, étendue $3.3-802 \mu\text{g/L}$) et seules 2% des femmes ont un niveau supérieur à $100 \mu\text{g/L}$. Cette proportion est à comparer aux 70 % et 61 % observés respectivement à la Oroya²⁰ ou à Cerro de Pasco²¹ dans des contextes comparables au Pérou. Ces valeurs moyennes, qui sont inférieures aux valeurs de références en France ($63 \mu\text{g/L}$ chez les femmes²²), sont paradoxalement basses si l'on considère la concentration de plomb observée dans l'environnement. Les rares femmes à avoir des niveaux très élevés sont dispersées dans la ville et l'enquête individuelle montre que l'exposition provient plus de comportement à risque que de la localisation du domicile. Du minerai, souvent concentré et destiné à la vente, a fréquemment été retrouvé au domicile, même si personne dans la famille ne travaille directement dans une des mines de la ville.

Les niveaux de cadmium et d'arsenic sanguin sont aussi très faibles, souvent inférieurs aux limites de détection (Cd 100% < limite de détection de $3.3 \mu\text{g/L}$; As 80% < limite de détection de $3.3 \mu\text{g/L}$). Seul l'antimoine apparaît relativement élevé avec en moyenne $10.5 \mu\text{g/L}$ (SD 1.96, étendue $2.5-370 \mu\text{g/L}$), ce qui constitue une des originalités de ce contexte.

Il existe une forte corrélation entre l'exposition de la mère et celle de l'enfant à la naissance mesurée sur le sang du cordon placentaire ($r=0.68$ pour le plomb) comparable aux données de la littérature²³. La proportion d'enfants qui naissent avec un saturnisme est donc très faible, de l'ordre de 2 % (7/339). Deux enfants avaient une plombémie jugée très préoccupante avec respectivement 460 et $800 \mu\text{g/L}$.

Impact sur le développement de l'enfant

Au total, 467 femmes enceintes ont accepté de contribuer à cette étude. L'évaluation précoce par l'échelle de Brazelton a concerné 279 enfants et à un an, le développement de 239 enfants a pu être évalué par l'échelle de Bayley.

Au cours de la première année, sur les 357 enfants dont nous avons pu documenter la naissance, au moins 12 sont décédés, ce qui représente un taux de mortalité minimum de 33.6 pour mille. Ce taux observé est très sous-estimé en raison du nombre de perdus de vue. Nous avons pu observer qu'il était extrêmement difficile de rencontrer les femmes qui ont perdu un enfant dans les premiers mois de vie, les familles préférant ne plus répondre à nos sollicitations, quelles qu'en soient nos efforts. Cette mortalité infantile élevée ne semble pas en rapport avec la contamination environnementale, mais plutôt liée à la précarité.

Immunité

Pour des raisons de faisabilité liées à la conservation et aux transports des prélèvements entre Oruro et le laboratoire à La Paz, l'étude immunologique a porté sur 150 prélèvements de sang de cordon ombilical. Après isolement, les lymphocytes issus du sang du cordon étaient soumis à des épreuves de prolifération en présence de phytohémagglutinine (PHA) ou de lipopolysaccharide (LPS).

Certains éléments métalliques comme As, Cr, ou Pb sont connus pour perturber l'immunité et notamment pour induire des réactions auto-immunitaires²⁴. Cependant, les observations proviennent souvent d'expositions professionnelles et peu d'études rapportent un effet des expositions environnementales,

notamment chez l'enfant²⁵. Dans cette étude, la prolifération des lymphocytes du sang du cordon en présence de PHA est apparue augmentée par les concentrations sanguines en plomb et en antimoine ($p < 0.01$ et $p < 0.05$) chez la mère. Pour LPS, la prolifération est uniquement corrélée à l'augmentation de la plombémie chez la mère ($p < 0.05$).

Dans cette étude, aucune relation statistiquement significative n'a été observée entre les concentrations en cytokine et la présence d'éléments traces métalliques toxiques, même si certains résultats sont compatibles avec une augmentation relative des cytokines pro-inflammatoires (IL6). De même, les niveaux plus élevés en cuivre semblent favoriser significativement les cytokines pro-inflammatoires INF γ , TNF α et IL6.

L'incidence des maladies infectieuses courantes, diarrhées, affections virales respiratoires, pneumopathies etc. a également été mesurée tout au long du suivi. Nous n'avons pas retrouvé de relation entre les concentrations en éléments traces métalliques dans le sang et la fréquence des ces infections.

Neurodéveloppement

Les enfants ont été examinés à plusieurs reprises par deux échelles distinctes, avant deux mois par l'échelle de Brazelton-NBAS, puis à 11 et 12 mois par l'échelle de Bayley. Comme évoqué précédemment, nous avons enregistré un nombre important de perdus de vue. L'anonymat urbain et la grande mobilité de ces populations, tant au niveau régional que local, ont rendu le suivi difficile. Au total, nous avons pu évaluer 279 enfants par l'échelle de Brazelton et 256 par l'échelle de Bayley.

Evaluation précoce – Echelle de Brazelton NBAS

L'échelle de Brazelton évalue le développement de l'enfant en observant 18 réflexes et 28 attitudes de l'enfant. Comme il est classique dans la littérature, nous avons regroupé ces observations en cinq catégories : Habituation - Orientation et Attention - Motricité et Réflexes - Système autonome - Interaction sociale.

Nous disposons de 639 examens exploitables réalisés auprès de 279 enfants à 10 jours ($n=195$), 1 mois ($n=223$) et 2 mois ($n=221$).

Nous avons observé plusieurs déterminants favorables au développement, comme le terme de grossesse (37-40 semaines), la stabilité sociale de la mère (en couple stable par opposition à célibataire ou veuve) et l'âge de la mère (favorable entre 18-35 ans).

A l'inverse, la consommation d'alcool et de tabac constituent des facteurs négatifs sur plusieurs registres du comportement de l'enfant. Les concentrations sanguines de la mère en plomb et en antimoine influent négativement sur la qualité de l'attention, sur l'irritabilité et sur la capacité d'interaction de l'enfant. Il en est de même avec la présence dans la famille d'une personne impliquée dans l'activité minière qui rapporte des outils ou des vêtements de travail.

Toutes les associations évoquées précédemment sont statistiquement significatives et nous travaillons actuellement sur des outils statistiques permettant d'ajuster cette information en évitant la répétition de tests d'hypothèses (modèles à variables latentes)²⁶.

Il est aujourd'hui admis que le plomb a des effets délétères sur le développement de l'enfant, même pour des expositions très faibles^{27,28}. Cependant, les expositions au plomb observées ici sont inférieures à celles de la majorité des populations considérées comme exposées. Elles sont comparables à ce que l'on observe en population générale dans les pays industrialisés en milieu urbain, ce qui impose des compléments d'analyse. Par ailleurs, il faut considérer que d'autres éléments métalliques présents dans cet environnement particulier et difficiles à mettre en évidence dans le sang pour des raisons de limite de détection (Cd, As, Mn, Sb) peuvent également participer à la toxicité de cette exposition multiple.

Evaluation à un an – Echelle de Bayley

A la fin de la première année, le développement de l'enfant permet d'explorer à la fois des fonctions motrices et des fonctions évoluées du développement cognitif. A l'inverse de l'échelle de Brazelton qui reste relativement qualitative, cette évaluation permet d'obtenir un score distinct pour les fonctions motrices et mentales. Théoriquement ce score peut être standardisé, mais en l'absence de référentiel adapté à notre population d'étude, nous avons utilisé la valeur brute.

Nous disposons de 465 examens exploitables réalisés à 11 mois ($n=224$) et à 12 mois ($n=241$). Plusieurs déterminants associés positivement au développement ont été observés : taille de l'enfant à la naissance (>49.7 cm), naissance à terme (≥ 37 semaines), naissance par voie basse et la présence de nombreux adultes dans le foyer familial (≥ 4). La concentration en éléments traces dans le sang n'est pas liée aux scores de l'enfant à la fin de sa première année. L'effet négatif du plomb ou de l'antimoine observé précocement semble disparaître à la fin de la première année.

Nous étudions actuellement la répartition spatiale des enfants dans la ville pour rechercher s'il existe des regroupements d'enfants aux performances moins bonnes dans certaines parties de la ville. Cette analyse permet d'améliorer notre modèle d'exposition en nous basant à la fois sur les biomarqueurs individuels disponibles et sur les informations issues des travaux en géochimie.

Exposition polymétallique et effet génotoxique

A côté des aspects évoqués précédemment, qui étaient planifiés dès le début du projet, une étude spécifique a été organisée à la demande de nos partenaires généticiens de la Faculté de Médecine de La Paz et cofinancée par un bailleur de fond local. Un sous groupe de 130 familles a participé à cette étude de faisabilité de l'évaluation de l'impact de l'exposition métallique sur l'expression de la pression génotoxique. Nous avons prélevé sur 130 paires mère-enfant un frottis buccal pour rechercher sur les cellules de la muqueuse des anomalies de divisions nucléaires. La technique des micronoyaux est une technique rustique, si on la compare à des techniques de génétique plus récentes, mais elle est relativement robuste²⁹. Les résultats montrent un nombre relativement élevé d'anomalies chez 35 à 40 % aussi bien des mères que des nourrissons. Le nombre moyen de micronoyaux était de 5.43 (SD 0.69) et 4.76 (SD 0.51) pour 1000 cellules respectivement chez les mères et les enfants. En dépit de cette élévation, nous n'avons pas retrouvé de corrélation avec les biomarqueurs mesurés (As et Cd urinaires, Pb et Sb sanguins).

Une des limitations de cette étude porte sur la taille de l'échantillon et sur la mesure très ponctuelle de l'exposition. Les biomarqueurs sanguins ou urinaires utilisés donnent une indication imparfaite de l'exposition individuelle et très variable dans le temps. Nous travaillons actuellement à améliorer notre compréhension de l'exposition en intégrant des informations complémentaires environnementales.

Géographie et Sociologie

L'équipe des sciences sociales a orienté ses recherches sur trois aspects distincts mais complémentaires : une réflexion et une remise en question des paramètres nécessaires à l'étude des risques dans des situations non événementielles, une analyse spatiale de ces paramètres selon trois hypothèses de travail, la mise en évidence de paramètres de perception de l'environnement et des types de comportements associés.

La théorie classique du risque^{30,31}, qui s'appuie principalement sur la notion de vulnérabilité et d'aléa, ne permet pas une analyse adaptée dans le cas de pollution minière de type rémanent et diffus. En effet il n'existe pas d'évènement qui engendre des dommages ou des dangers spécifiques (comme dans le cas de séisme ou d'épidémie) et ces dommages ne peuvent être directement associés à des effets particuliers (destructions ou maladies). La situation sociale des populations et leur mode de vie sont aussi des paramètres de génération du risque qui sont parfois priorisés de manière plus consciente que des impacts environnementaux sur lesquels ils appuient leurs activités depuis des décennies. Nous avons par conséquent été amenés à étendre cette théorie à des situations de risques sociétaux, en nous tournant en particulier vers la psychologie environnementale et la théorie de la décision^{32,33}. Ces disciplines insistent plus sur la notion de perception des phénomènes et de leur déclinaison en termes de comportement et de décision de vie, dépendante du niveau d'implication des acteurs dans l'activité polluante³⁴. Cette analyse théorique fait actuellement l'objet de la rédaction de deux publications qui seront soumises début 2011 à Nature, Sciences Société et Risk Analysis. Cette réflexion nous a permis d'établir trois hypothèses qui ont orientées notre travail :

- l'hypothèse de la proximité spatiale de la contamination ;
- l'hypothèse de l'importance des conditions de vie ;
- l'hypothèse de la relation perception - comportement.

Chaque hypothèse est relative à la détermination de zones spécifiques où les paramètres de risque sont préoccupants. Ces zones sont définies comme des aires de concentration de paramètres identiques où l'on considère qu'il existe un phénomène collectif et par conséquent une situation de risque. La superposition de ces zones nous permet d'examiner les coïncidences spatiales entre paramètres et de déterminer ainsi les aires où les phénomènes collectifs se combinent. Cette méthodologie, décrite dans un article exposé à un congrès international de géographie, permet de superposer des informations de natures diverses (quantitatives ou qualitatives) et de sources diverses (GPS, recensement, mesures, enquêtes, etc.) et d'établir des relations simples entre paramètres qui peuvent ensuite être modélisées.

La première hypothèse s'est basée sur la réalisation d'une notation du degré de pollution potentielle des sites d'activités liés ou non à la mine : site minier, fonderie, industrie métallurgique, industrie chimique, petite et moyenne entreprise de traitement, industrie secondaire (cimenterie, céramique, etc.) et industrie agro alimentaire. L'utilisation de techniques d'analyse par densité et buffer a permis de réaliser un premier zonage qui indique les pôles de pollution potentielle.

La seconde hypothèse est basée sur l'analyse de 50 variables de vulnérabilité socio économique issues du recensement de la population au niveau de la cuadra (bloc de maison). Cinq de ces variables ont été retenues pour construire un indice global de vulnérabilité socio économique : la densité d'enfant de moins de cinq ans, le degré d'analphabétisme des familles, la part des femmes ayant leur accouchement sans assistance médicale, le taux de dépendance économique, la proportion de maison sans sanitaires. L'indice général de vulnérabilité socio économique montre un modèle relativement classique des villes en forte expansion démographique et spatiale : des conditions qui se dégradent en allant du centre vers la périphérie. Ce modèle montre la complexité de l'étude de ce type de risque diffus puisque la vulnérabilité sociale ne coïncide que très peu avec les zones de pollutions potentielles dans la mesure où les zones périphériques ont englobées ou ont dépassées les zones d'activités polluantes (en particulier les anciennes fonderies de début du XXème siècle et les *ingenios*).

La troisième hypothèse a permis de mettre en évidence les relations existantes entre la perception à plusieurs échelles des problèmes d'environnement, quels qu'ils soient, le comportement relatif à ces problèmes et au risque sanitaire, et la catégorie d'acteur, c'est-à-dire son degré d'implication dans l'activité minière. La hiérarchisation des perceptions a montré un intérêt limité des populations pour les thèmes liés à l'activité minière, et d'autant plus limités que ces populations se situent plus loin des activités. La préoccupation majeure est immédiate et proche, sur des questions événementielles et de vie quotidienne (politique, économique, pollution des ordures ménagères ou des eaux stagnantes, etc.), d'autant que les populations ne perçoivent pas de symptômes spécifiques liés au minier, ou n'associent pas ces symptômes à l'activité minière (cancer, avortement ou retard mental en particulier). Par ailleurs, l'activité minière est considérée comme bénéfique du point de vue social et économique (apport direct ou indirect), faisant partie du patrimoine (carnaval) et du paysage de la ville (phénomène d'accoutumance au paysage et aux nuisances directes). Quelques soient les catégories professionnelles, on retrouve par conséquent une perception positive de l'activité minière et une occultation semi-consciente des effets de cette activité. Les comportements s'associent alors à des relations indirectes avec les sources même de pollution : les poussières sont les effets de l'absence de politique d'aménagement des rues ; les ordures ménagères de l'absence de discipline des usagers ; les problèmes de santé des conditions de vie à Oruro. Il existe par ailleurs un niveau important de dé-responsabilisation des professionnels vis-à-vis des problèmes liés à l'activité minière : beaucoup font des mesures mais peu les interprètent ou les opérationnalisent dans des politiques.

La superposition des résultats de l'analyse spatiale de ces trois ensembles de paramètres nous a permis de dégager une typologie des modes de pollution et des conséquences en termes de perception, comportement et densification des effets sanitaires. La méthodologie et les résultats ont fait l'objet de la rédaction d'un rapport de 210 pages qui sera publié en espagnol au PIEB. Il reste aujourd'hui à traduire ces résultats en termes de recommandations pour des politiques d'appui, de conscientisation et de prévention.

Synthèse et intégration des résultats géochimiques, épidémiologiques et sociologiques

L'intégration des données sociétales a permis i) d'identifier la nature et la localisation des activités polluantes et 2) d'optimiser le suivi géochimie (aérosols PM_{10} et $PM_{2.5}$) en suivant le même maillage géographique.

L'analyse des données de géochimie des aérosols (PM_{10} et $PM_{2.5}$) et la mesure de l'exposition des enfants dans les écoles montrent clairement un lien étroit entre la qualité de l'air et l'exposition en particulier dans le quartier de Vinto où se concentrent les fonderies [Goix et al. Soumis cf. page 13]. Le profil d'éléments (non-essentiels) originaire de la fonderie retrouvé dans les aérosols est très proche (Pb, Sb, Ag, As) de celui retrouvé dans les cheveux en considérant le fait que certains éléments sont biorégulés comme le Zn (la concentration ne reflétant pas le niveau d'exposition).

Les faibles niveaux d'exposition observés chez les mères et sur le sang du cordon sont surprenants dans cet environnement fortement contaminé. Les observations faites chez les enfants d'âge scolaire et le dosage du plomb total dans les poussières en particulier dans le quartier de la mine [Fonturbel et al. Cf page 13], laissaient entrevoir une situation de forte exposition. La faible biodisponibilité, notamment du plomb présent sous forme complexe stable soufré (PbS) dans les poussières, explique sans doute ces résultats. D'autres auteurs ont pu observer de faibles plombémies dans des contextes contaminés^{35,36}. Une partie de l'explication réside également dans la faible teneur en plomb des aérosols dans la majeure partie de la ville et par l'absence de contamination de l'eau de boisson. En dehors de quelques zones très ponctuelles, la contamination atmosphérique n'est pas très élevée pour le plomb. Les éléments retrouvés dans les PM_{10} et $PM_{2.5}$ sont principalement l'arsenic, le cadmium et l'antimoine.

La grande dispersion spatiale des rares familles identifiées comme fortement contaminées par le plomb trouve également une explication dans les observations des géographes et des géochimistes. La

complexité du tissu socio industriel avec d'innombrables sources de pollution métallique a été très largement documentée par le recensement et par la géolocalisation des industries polluantes par l'équipe de géographie humaine. Par ailleurs, les dosages des métaux dans les sols, dans les poussières ou dans les aérosols confirment la complexité de l'organisation spatiale des pollutions en milieu urbain.

L'absence de préoccupation spécifiquement reliée au risque de pollution minière a été observée par les sociologues et notre expérience du suivi des familles confirme cette observation. La relative précarité de ces populations et les nombreuses difficultés professionnelles, matérielles, etc. font de la pollution environnementale une préoccupation secondaire. L'adhésion au suivi médical proposé dans ce projet dépendait le plus souvent de l'intérêt de la mère pour les conseils nutritionnels qu'elle recevait lors des consultations régulières et non d'une préoccupation liée à ces pollutions.

Production Scientifique

Articles publiés dans des revues à comité de lecture

Moya N, Gibon F-M, Oberdorff T, Rosales C, Dominguez E. Comparación de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos intermitentes y permanentes del altiplano boliviano : implicaciones para el futuro cambio climático. *Ecologia Aplicada*, 2009;8:105-114.

Barbieri FL, Cournil A, Souza Sarkis JE, Benefice E, Gardon J. Hair Trace Elements Concentration to Describe Polymetallic Mining Waste Exposure in Bolivian Altiplano. *Biol Trace Elem Res*. 2010 Mar 9 ([Epub ahead of print]).

Moya N, Hughes RM, Domínguez E, Gibon F-M, Goitia E, Oberdorff T. Macroinvertebrate-based multimetric predictive models for evaluating the human impact on biotic condition of Bolivian streams. *Ecological Indicators*, 2010. doi:10.1016/j.ecolind.2010.10.012

Tapia J, Audry S, Townley B, Duprey J-L. Geochemical background, baseline and origin of trace metals from lacustrine sediments in the mining-impacted Altiplano and Eastern Cordillera of Oruro. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* (*In press*)

Goix S, Point D, Oliva P, Polve M, Duprey J-L, Mazurek H, Huayta C, Barbieri F, Gardon J. Influence of source distribution and geochemical composition of aerosols on human exposure in the case of the large polymetallic mining activities on the Bolivian Altiplano (Oruro). (Soumis)

Fontúrbel FE, Barbieri E, Herbas C, Barbieri FL, Gardon J. Indoor metallic pollution related to mining activity in the bolivian Altiplano. (Soumis)

Ouvrage

Ascarrunz ME, Gardon J, Barbieri F, García ME, Tirado N, Cuti M, Paco P, Mejía C, Ruiz M, Ormachea M, Mercado M. Dano genotóxico por contaminación minera en Oruro. La Paz, Bolivia: Fundación PIEB; La Paz, Bolivia; 2010.

Thèses en préparation:

Nabor Moya (Ecologie)

Richesse et structure fonctionnelle des communautés benthiques des cours d'eau néotropicaux. Application à la gestion des eaux continentales de trois régions boliviennes. Thèse de Doctorat de la Universidad Nacional de Tucumán: Ciencias Biológicas. Bourse IRD. (Codirection T. Oberdorff, IRD et E. Dominguez, Université nationale de Tucuman - Argentine). Soutenance prévue 2011.

Joseline Tapia Zamora (Géochimie)

Etude du comportement biogéochimique et historique des polluants miniers dans les systèmes lacustres de l'Altiplano Bolivien. Bourse IRD-CONICYT. (Codirection S; Audry, CNAP, LMTG et Brian Towneley, Université du Chili). Soutenance prévue Juin 2011.

Sylvaine Goix (Géochimie)

Impacts environnementaux des contaminations polymétalliques liées à l'activité minière sur le continuum atmosphère-eau-sol-plante et la santé humaine : cas de Oruro, altiplano bolivien. Ecole doctorale SDU2E, Université Paul Sabatier Toulouse. (Codirection, Priscia Oliva- Jacques Gardon).

Maria Ruiz Castel (Epidémiologie)

On the Contaminated Environment of a Mining City in Bolivia and its Direct Effects on Child Neurodevelopment. Universitat Pompeu Fabre, Barcelone. Bourse CREAL (Codirection, Jordi Sunyer - Jacques Gardon)

Flavia Barbieri (Epidémiologie)

Polymetallic contamination and its impact on human health and society: A mining city in the Bolivian Altiplano (Highlands). Université La Charité, Berlin, (Professeur Thomas Kiel).

Retombées du projet

Ce projet a participé à dynamiser considérablement ce champ de recherche en Bolivie et plusieurs projets parallèles ont vu le jour. Le PIEB (*Programa de Investigación Estratégica en Bolivia*) a par exemple organisé un appel d'offre qui a permis de financer une dizaine de projets allant de la faisabilité des mesures de remédiations à des études épidémiologiques ou d'anthropologie sociale. Le ministère de l'environnement travaille à un appel d'offre pour la mise au point d'un indice biologique de qualité des eaux au niveau de l'ensemble du pays. Les résultats obtenus dans le cadre de Toxbol ont montré la faisabilité d'un tel projet, ils ont par ailleurs fixé un niveau élevé pour l'adaptation de la démarche aux conditions écologiques et faunistiques locales. L'Institut d'Ecologie de l'UMSA a entrepris une vaste étude environnementale de la province *Pacajes*, en relation avec les administrations et les communautés locales.

De nombreux étudiants ou jeunes chercheurs boliviens ont participé à ce projet. Plusieurs thèses de sciences ont débuté dans le cadre de ce projet et sont en cours (cf ci-dessus).

Tout au long du projet, nous avons attaché une grande importance à la communication avec les autorités de la ville : Préfecture, Mairie, Service des Actions de Santé. A l'issue du projet en octobre 2010, nous avons organisé un colloque de trois jours à Oruro³⁷, qui a réuni 300 scientifiques venus d'une vingtaine de pays. Nous pensons que toutes ces initiatives favorisent une prise de conscience environnementale aussi bien des autorités que de la population.

Perspectives

Il existe en Bolivie une forte demande pour ce type d'étude, nous avons pu le vérifier récemment lors d'une rencontre avec le Gouverneur du Département de Potosi qui sollicite notre participation dans l'organisation d'un tel programme dans sa ville.

Les résultats scientifiques nouveaux qui émergent de ce travail montrent clairement le besoin d'intégrer de façon plus importante les approches de sciences sociales aux autres disciplines environnement-santé-écologie.

Ces travaux démontrent clairement toute la difficulté du travail multidisciplinaire en milieu urbain. Nous envisageons par exemple de développer un axe métrologique exploratoire autour de l'utilisation des isotopes stables d'éléments non-traditionnels par spectrométrie de masse à multicollection (MC-ICP-MS) pour les contaminants miniers spécifiques à cette région (Zn, Cu, Pb, Sb, Sn). L'application de ce type de mesure sur les banques d'échantillons biologiques (sang-cheveux) du projet, dans les échantillons des grands compartiments environnementaux (aérosols, sols, eaux, poussières) et des principales sources de pollution (minerais, fonderies) collectés selon le même espace géographique devrait nous permettre de mieux caractériser les relations qui existent entre la qualité de l'environnement, le transport et l'origine des polluants et leur effets sur la santé en milieu urbain complexe.

Des questions restent en suspens sur le niveau d'exposition des enfants et une enquête sanitaire de dépistage du saturnisme dans différentes tranches d'âges permettrait de mieux cerner les populations et les périodes à risques. Une telle étude relève cependant autant des actions sanitaires que de la recherche scientifique.

L'importance de la contamination des lacs et leur originalité écologique (altitude, climat) ont permis de définir des questions scientifiques nouvelles. Un projet a été élaboré avec de nouveaux partenaires (notamment l'Institut pluridisciplinaire de recherche sur l'environnement et les matériaux, UMR CNRS5254 et Université de Pau). Un premier financement (EC2CO/CYTHRIX, INSU) a permis la mise en place du projet COMIBOL (Fractionnement isotopique de deux contaminants miniers modèles (Zn, Sn) aux interfaces sédiment-eau-système trophique d'un écosystème lagunaire de l'Altiplano Bolivien). Ce projet a entrepris également l'étude des bactéries sulfato-réductrices et celle de la méthylation du mercure sur le lac Uru-Uru.

Le succès de ce projet ainsi que l'engouement autour du colloque organisé sur ce thème dans les Andes a eu un rôle moteur dans le lancement par l'IRD du Programme Pilote Régional RIVIA (Risques, Vulnérabilités et Impacts dans les Andes) dans les Andes, en particulier centré autour des questions liées aux dommages sociaux, environnementaux et sanitaires liés aux activités extractives.

Références Bibliographiques

- ¹ Cunningham CG, McNamee J, Pinto Vasquez J, Ericksen GE. A model of volcanic dome-hosted precious metal deposits in Bolivia. *Economic Geology* 1991;86:415-421
- ² Garcia ME, Persson KM, Bengtsson L, Berndtsson R. History of Mining in the Lake Poopo Region and Environmental Consequences. *Vatten* 2005;61:243-248
- ³ Wasson J.-G., Guyot J.-L., Sanejouand H., 1991. Premières données concernant le Carbone Organique transporté par le Rio Desaguadero (Altiplano Bolivien). *Revue des Sciences de l'eau*, 4: 363-379.
- ⁴ Zamora G. (éd. scient.), 2007. Evaluacion ambiental del Lago Poopo y sus Rios tributarios. Document multigraphié, UTO-MINCO-FUNDECO-KOMEX, Oruro: 200 p.
- ⁵ Proyecto Piloto Oruro (PPO 1996). Hydrology of the PPO area. COMIBOL & Swedish Geological AB.
- ⁶ Rapant S, Dietzova Z, Cicmanova S. Environmental and health risk assessment in abandoned mining area, Zlata Idka, Slovakia. *Environ Geol* 2006;51:387-397
- ⁷ Fraser B. Peruvian mining town must balance health and economics. *Lancet* 2006;367:889-890
- ⁸ Aseste J, Cáceres W, del Carmen Gaztañaga M, Lucero M, Sabastizagal I, Oblitas T, Pari J, Rodriguez F. Intoxicación por plomo y otros problemas de salud en niños de poblaciones aldeñas a revalas mineros. *Rev Peru Med Exp Salud Publica* 2009;26(1):15-19
- ⁹ Malcoe LH, Lynch RA, Keger MC, Skaggs VJ. Lead sources, behaviors, and socioeconomic factors in relation to blood lead of native american and white children: a community-based assessment of a former mining area. *Environ Health Perspect*. 2002;110:221-31.
- ¹⁰ Lynch RA, Malcoe LH, Skaggs VJ, Kegler MC. The relationship between residential lead exposures and elevated blood lead levels in a rural mining community. *J Environ Health* 2000;63(3):9-15.
- ¹¹ Murgueytio AM, Evans RG, Roberts D, Moehr T. Prevalence of childhood lead poisoning in a lead mining area. *J Environ Health* 1996;58(10):12-17.
- ¹² Mercado, M. Evaluación de los niveles de contaminación por plomo y arsénico en muestras de suelos y productos agrícolas procedentes de la región cercana al complejo metalúrgico Vinto. *Revista Boliviana de Química*. 2009;26:101-110.
- ¹³ Karr J. R., Chu E. W., 1999. Restoring life in Running Waters : Better Biological Monitoring. Island Press, Washington, DC.
- ¹⁴ Oberdorff T., Pont D., Huguely B., Porcher J. P., 2002. Development and validation of a fish-based index (FBI) for the assessment of "river health" in France. *Freshwater Biology* 47: 1720-1735.
- ¹⁵ Moya N., Tomanova S., Oberdorff T., 2007. Initial development of a multi-metric index based on aquatic macroinvertebrates to assess streams condition in the Upper Isiboro-Sécure Basin, Bolivian Amazon. *Hydrobiologia*, 589: 107-116.
- ¹⁶ Molina C. I., Gibon F.-M., Duprey J.-L., Dominguez E., Guimaraes J.-R. D. and Roulet M., 2010 a. Transfer of mercury and methylmercury along macroinvertebrate food chains in a floodplain of the Beni River, Bolivian Amazonia. *Science of the Total Environment*, 408 (16) : 3382-3391.
- ¹⁷ Molina C. I., Gibon F.-M., Oberdorff T., Dominguez E., Pinto J., Marin R. and Roulet M., in press. Macroinvertebrate food web structure in a floodplain lake of the Bolivian Amazon. *Hydrobiologia*, in press.
- ¹⁸ Tapia J, Audry S, Townley B, Duprey J-L. Geochemical background, baseline and origin of trace metals from lacustrine sediments in the mining-impacted Altiplano and Eastern Cordillera of Oruro. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* (In Press)
- ¹⁹ Rainbow P. S., 2002. Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: why and so what? *Environmental Pollution* 120: 497-507.
- ²⁰ Serrano F. Evidencia científica y políticas de salud y protección ambiental: El caso de la Oroya y la cuenca del Mantaro. *In Coloquio Metales y Medio Ambiente en los Andes y la Amazonia: Monitoreo, efecto y gestion ambiental de los metales*; 14-16 octubre 2009; Lima, Peru
- ²¹ Astete Comejo J, Oblitas Carranza T. Determinación de plomo en sangre y factores asociados en niños y gestantes de las comunidades de Quiulacocha y Champamarca - Cerro de Pasco. Setiembre 2005. *In Coloquio Metales y Medio Ambiente en los Andes y la Amazonia: Monitoreo, efecto y gestion ambiental de los metales*; 14-16 octubre 2009; Lima, Peru.
- ²² INRS http://www.inrs.fr/htm/plombemie_-_plomb_sanguin.html
- ²³ Plusquellec P, Muckle G, Dewailly E, Ayotte P, Jacobson SW, Jacobson JL. The relation of low-level prenatal lead exposure to behavioral indicators of attention in Inuit infants in Arctic Quebec. *Neurotoxicol Teratol*. 2007;29(5):527-37.
- ²⁴ Rowley BM, Monestier BM. Mechanisms of heavy metal-induced autoimmunity. *Mol. Immunol*. 2005;42: 833-838.
- ²⁵ Sarasua SM, Vogt RF, Henderson LO, Jones PA, Lybarger JA. Serum immunoglobulins and lymphocyte subset distributions in children and adults living in communities assessed for lead and cadmium exposure. *J. Toxicol. Environ. Health A* 2000;60:1-15.
- ²⁶ Patel AB, Mamtani MR, Thakre TP and Kulkarni H. Association of umbilical cord blood lead with neonatal behavior at varying levels of exposure. *Behav Brain Funct*. 2006;27:22
- ²⁷ Bellinger DC. Lead. *Pediatrics*. 2004;113:1016-22.
- ²⁸ Needleman H. Low Level Lead Exposure: History and Discovery. *Annals of Epidemiology* 2009;19:235-8
- ²⁹ Holland N, Bolognesi C, Kirsch-Volders M, Bonassi S, Zeiger E, Knasmueller S, Fenech M. The micronucleus assay in human buccal cells as a tool for biomonitoring DNA damage: the HUMN project perspective on current status and knowledge gaps. *Mutat Res*. 2008;659(1-2):93-108.
- ³⁰ Metzger P. & R. D'Ercole, 2009. Enjeux territoriaux et vulnérabilité. Une approche opérationnelle. *Risques et environnement: recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*. S. Becerra&A. Peltier. Paris: L'Harmattan, 391-402p.
- ³¹ Dauphiné A., 2003. *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Paris: Armand Colin, 288p.
- ³² Zinn (Editor) J. O., 2009. *Social theories of risk and uncertainty: an introduction*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 252p.
- ³³ Renn O., 2008. Concepts of risk: an interdisciplinary review. Part1: disciplinary risk concepts. *GAIA* 17/1: 50-66.
- ³⁴ Haines Y. Y., 2009. On the complex definition of Risk: a systems-based approach. *Risk Analysis* 29(12): 1647-1654.
- ³⁵ Danse LHR, Garb LG, Moore H. Blood lead surveys of communities in proximity to lead-containing mill tailings. *Am Ind Hyg Assoc* 1995;56(4):384-393.
- ³⁶ Berglund M, Lind B, Sörensen S, Vahter M. Impact of soil and dust lead on children's blood lead in contaminated areas of Sweden. *Arch Environ Health*. 2000;55(2):93-7.
- ³⁷ http://www.pieb.com.bo/cont_metal_fra.php