



HAL
open science

L'interdisciplinarité en actes : le recyclage artisanal du plomb dans les ateliers de l'Uttar Pradesh

Paul Lhoste, Yann Philippe Tastevin, Rémi de Bercegol, Shankare Gowda, Mélina Macouin, Laurent Cassayre

► **To cite this version:**

Paul Lhoste, Yann Philippe Tastevin, Rémi de Bercegol, Shankare Gowda, Mélina Macouin, et al. L'interdisciplinarité en actes : le recyclage artisanal du plomb dans les ateliers de l'Uttar Pradesh. Tracés : Revue de Sciences Humaines, 2022, 22, pp.47-74. <10.4000/traces.14686>. <halshs-03928585>

HAL Id: halshs-03928585

<https://shs.hal.science/halshs-03928585v1>

Submitted on 7 Jan 2023

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.



HAL Authorization

L'interdisciplinarité en actes : le recyclage artisanal du plomb dans les ateliers de l'Uttar Pradesh

Paul LHOSTE, Yann-Philippe TASTEVIN*, Rémi DE BERCEGOL, Shankare GOWDA, Mélina MACOUIN, Laurent CASSAYRE

* Auteur correspondant : yann.tastevin@cnrs.fr

Introduction

Le parti-pris de cette contribution est de donner à voir une approche interdisciplinaire en actes, plus précisément une approche incarnée et ancrée sur des terrains difficiles d'accès, où l'enquête est menée à différentes échelles pour appréhender les multiples dimensions des dynamiques de remise en circulation des déchets dans une économie globale. L'objet n'est pas de détailler et d'exploiter des résultats et données scientifiques, mais de dessiner les contours d'une démarche et des détours d'une enquête collective en cours. Où l'on explore simultanément les dimensions politiques, techniques et environnementales de l'exploitation de ce qu'on appelle la mine urbaine, c'est-à-dire l'exploitation profitable de nos rebuts, en particulier des métaux déjà extraits et qui se trouvent désormais dans l'ensemble des artefacts produits par l'homme (technosphère). À partir de terrains spécifiques et d'un objet déterminé collectivement, nous allons montrer comment s'est construit de manière itérative et incertaine le recours interdisciplinaire aux sciences humaines et sociales (anthropologie des techniques, géographie sociale), aux sciences de l'ingénieur (génie des procédés) et aux géosciences (géophysique, géochimie). L'analyse structurale et élémentaire, la thermodynamique des procédés et l'approche ethnographique sont ainsi étroitement liées par un même enjeu : dépasser une approche empirique pour mieux décrire la mine urbaine¹.

Rétrospectivement, on pourrait penser que les déchets et leur « recyclage » constituent un objet en soi, facile à appréhender de différents points de vue disciplinaires, qu'il y aurait quelque chose d'évident, de forcément fructueux dans le recours de l'anthropologie des techniques au génie des procédés et réciproquement. Il faut dire que l'enjeu est fort, tout comme le contraste épistémique entre sciences physiques et sciences humaines et sociales.

Les déchets constituent aujourd'hui le principal gisement de ressources en croissance à l'échelle mondiale (Banque mondiale, 2018). En découle une « ruée vers l'ordure » (Cavé, 2015), manifeste dans les agglomérations de la planète. En effet, les villes regorgent de « matières premières urbaines » pour reprendre l'expression de Sabine Barles (2009), qui pourraient être utilisées autrement. C'est ainsi qu'est avancé le concept de « mine urbaine », attribué à Jane Jacobs en 1961 quand elle prédisait que « les villes ser[ai]ent les mines du futur » (cité par Graedel, 2011). Autrement dit, les gisements urbains sont contenus dans les biens de consommation courante (leur extraction renvoyant dans ce cas à la problématique classique du recyclage), ou dans les superstructures, les infrastructures et les sols urbains (D'Arienzo 2017, Wallsten, 2015).

Pour qui s'intéresse à la mine urbaine une question majeure se pose alors : comment s'y plonger et frayer dans cette masse composite « d'objets solides inanimés fabriqués par l'humain » (Elhacham, Ben-Uri, Grozovski, Bar-On, et al., 2020) ? Où se situer pour saisir et décrire les flux hétérogènes des matières immobilisées, qui viennent faire filière à nouveau ? Il faut bien comprendre que dans leur phase d'usage,

¹ Nous tenons à remercier chaleureusement Pierre Aimar pour sa contribution essentielle à l'ensemble du présent article. Nos remerciements aussi aux éditeurs, à Vanessa Manceron et Claire Dutrait pour leurs reprises généreuses en même temps qu'exigeantes.

toutes sortes de produits (véhicules, équipements électriques ou électroniques, emballages, matériaux de construction) prennent part selon des temporalités propres à la constitution d'un stock gigantesque en cours d'utilisation.

Nous avons ici privilégié une entrée par le démantèlement des stocks urbains de déchets, en nous restreignant à la remise en circulation des métaux qui les composent. Mais le chantier d'investigation reste trop vaste. Il doit se recentrer sur un objet facilement appréhendable pour pouvoir étudier le cœur des procédés de recyclage tels qu'ils sont mis au point et pratiqués dans les « pays du Sud », et sur un terrain approprié, certaines zones industrielles comportant parfois des difficultés majeures d'accessibilité (suspicion, protection contre l'espionnage industriel, barrières de la langue...). Jusqu'alors, peu d'enquêtes se sont donné les moyens de décrire finement les procédés à l'œuvre alors que la valeur se crée précisément dans la diversité des capacités de transformation de la matière.

Ici, l'interdisciplinarité prend acte dans les accès qu'elle permet, que ce soit des lieux, des personnes, des techniques, des échelles d'observation ou d'analyse. Le dispositif d'enquête repose sur la présence au long cours d'une partie de l'équipe et sur des incursions collectives de courte durée. En Inde, les chercheurs en sciences sociales ont su débusquer un cluster méconnu du plomb recyclé, négocier l'entrée dans les fonderies, tandis que les collègues ingénieurs ouvraient l'enquête à des échelles plus fines, là où l'approche ethnographique se trouvait empêchée, à savoir au cœur du four, où interviennent les réactions chimiques nécessaires au processus de recyclage. De la filière au procédé, chemin faisant, l'enquête arpentait un angle mort des chaînes globalisées de recyclage : encore fallait-il trouver et se donner les moyens de prendre la mesure des effets locaux sur les milieux de vie de la transformation de la matière.

Ces ajustements se sont réalisés progressivement lors de workshops², de visites d'usines³, de réponses à différents appels d'offre⁴, un processus collectif de découpage, d'analyse (au sens étymologique de décomposition), soit une série d'opérations qui divisent, séparent, distinguent les contours d'un objet de recherche encore flou. Un travail d'explicitation du vocabulaire, des questions, des méthodes de chacun a été nécessaire pour pointer des angles morts, débusquer des intersections ou des échelles de caractérisations pertinentes du point de vue des disciplines engagées. Le choix du recyclage de batteries au plomb a finalement émergé, choix paradoxal à l'heure du déploiement qui semble hégémonique des batteries de technologie lithium-ion (Xie et Lu, 2020), mais qui se justifie par de nombreux aspects.

Éléments de contexte : le recyclage du plomb

Dotée d'une durée de vie nettement plus courte que celle du véhicule qu'elle équipe (4 ans contre 20 ans en moyenne), la batterie au plomb des véhicules thermiques mobilise des quantités importantes de ce métal (de 6 à 18 kg par véhicule en moyenne). Cet usage confère à la batterie au plomb un caractère

² Séminaire MinUrba « les catégories d'acteurs du recyclage des métaux : entre local et global » (organisation B. Jouve ; 5-6 février 2020 ; LISST, Labex SMS Toulouse) & Workshop « Regards croisés sur la mine urbaine (organisation Y-P. Tastevin ; 7-8 décembre 2021 ; IRL ESS-UCAD, Dakar). Avec le soutien de la MITI du CNRS et de l'UCAD. Ce workshop international a été organisé dans le cadre du projet AirGeo, financé par le Belmont Forum.

³ Enquêtes de terrains en Inde en novembre et décembre 2019, financée par la MITI du CNRS, dans le cadre du projet « ALTER SYSTEMES. Altérations, Alternatives et Altérités des services de base dans les marges infrastructurelles des villes aux Suds », coordonné par Remi de Bercegeol ; puis en novembre et décembre 2021, enquête financée par la MITI du CNRS, dans le cadre du projet Recycl'Batt, coordonné par Laurent Cassayre ; ou encore au Sénégal en mars 2020.

⁴ Obtention d'une Thèse 80prime (volet transversalité, 2019-2022) : « Le dualisme high tech / low tech au prisme de la modélisation des procédés : exemple de la mine urbaine », entre le Laboratoire de Génie Chimique (LGC) et le Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST). Notre consortium est aussi lauréat de l'appel d'offre Metallo'mix (MITI, CNRS, mars 2021).

universel car elle est uniformément distribuée dans les pays du globe, par le biais d'un objet emblématique de la seconde moitié du XX^{ème} siècle, la voiture. Elle constitue donc une source de matière première dite recyclable ou « secondaire », par opposition aux sources primaires provenant directement de la mine. Viennent ensuite des raisons liées à la simplicité de l'objet et de son recyclage. Simplicité de l'élément plomb, dont la température de fusion (327 °C) est basse comparée à celle de nombreux métaux usuels, ce qui rend sa mise en forme aisée. Simplicité de l'objet batterie, composé de seulement quelques éléments chimiques contre une quinzaine pour les batteries au lithium, ce qui se traduit en une facilité des opérations de recyclage. Enfin, la toxicité importante du plomb⁵ restreint son usage à des applications non dispersives, dans des objets facilement collectables comme les batteries.

L'ensemble de ces éléments explique d'une part que le plomb est le métal dont la part de la production par le recyclage est la plus importante (plus de la moitié du plomb produit annuellement provient de sources secondaires, voir Zhang et al., 2016), dont l'usage est concentré dans une utilisation principale qui est la batterie automobile. D'autre part, la simplicité de recyclage de l'objet batterie donne lieu à un foisonnement de techniques et de procédés de par le monde.

La batterie au plomb usagée constitue une source de matière secondaire locale et universelle d'une relative simplicité puisque contenant seulement 4 éléments chimiques différents en sus de l'enveloppe plastique : plomb (Pb), soufre (S), oxygène (O) et hydrogène (H). Après drainage de l'acide sulfurique qui sert d'électrolyte, seul l'oxygène (sous forme d'oxydes comme PbO et PbO₂) et le soufre (sulfate de plomb, PbSO₄) restent associés au plomb métallique. L'enjeu du recyclage est de parvenir à séparer ces éléments pour obtenir le plomb sous une forme chimiquement pure. Ces opérations sont des réactions de réduction des oxydes et de désulfuration (Blazy et Jdid, 2011). De manière générale, elles se réalisent spontanément en présence de carbone, à haute température (typiquement 900 à 1000 °C), ce qui nécessite un apport de chaleur souvent issu de la combustion d'hydrocarbure et/ou de charbon.

Le plomb contenu dans les batteries se présente donc sous plusieurs formes chimiques qu'il faut d'abord convertir en plomb métal, avant de couler celui-ci sous forme de lingots : ce sont ces transformations qui dictent les opérations de retraitement, leur ordonnancement, leurs conditions que nous aurons à identifier puis à comprendre dans la suite de notre étude.

Dans ce contexte, le commerce des batteries de voiture reflète une situation paradoxale de « recyclage » informel de longue date. Jusqu'aux travaux de Cholez et Trompette à Madagascar (Cholez et Trompette, 2020), la trajectoire singulière de cet objet omniprésent était plutôt invisible. Scrutant les circuits de recyclage des batteries plomb-acide en Afrique, Manhart et Schleicher montrent l'importance du secteur informel de la réparation et du reconditionnement de batteries (Schleicher et Manhart, 2015). À l'instar de nombreux autres observateurs (par exemple Gottesfeld et Pokhrel, 2011 ; Manhart, 2016), ces recherches se concentrent sur le vaste commerce international du plomb pour dénoncer légitimement des profits inconsidérés au regard des conditions désastreuses du recyclage informel du plomb dans les pays pauvres (Cholez et Trompette, 2020).

Une autre problématique déjà évoquée et bien documentée montre que le recyclage du plomb constitue l'une des activités de transformation de la matière les plus polluantes au monde du fait de la forte toxicité du plomb pour les organismes vivants (Landrigan et al., 2018). Si les normes environnementales ont poussé les industries modernes à limiter au maximum les émissions autour des sites industriels, le recyclage non-officiel (aussi appelé « d'arrière-cour ») des batteries plomb-acide usagées est une source répandue d'exposition au plomb. Ainsi, en 2017, il a été évalué que plus de 20 000 sites urbains, répartis dans 90 pays, procèdent au traitement dit « informel » de batteries au plomb (Ericson, Landrigan, Taylor, Frostad, et al., 2017). En parallèle, 82% des 900 000 décès annuels attribuables au plomb surviennent dans les pays pauvres (Fuller et al., 2022).

⁵ Cf. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2022 ou encore « Lead (Pb) Toxicity: What Are U.S. Standards for Lead Levels? » Environmental Medicine, ATSDR, 2022

Les effets sur la santé des procédés artisanaux sont plutôt bien connus (Ericson et al., 2021). En revanche, d'autres aspects liés au recyclage des batteries au plomb sont moins décrits et soulèvent de nombreuses questions : que sait-on des mondes sociaux du recyclage de métaux dans les pays du Sud ? Des organisations qui les structurent ? Des espaces qu'ils occupent ? Des acteurs et des réseaux marchands qu'ils animent ? Comment ces recycleurs travaillent-ils ? Quels sont leurs savoir-faire ? Comment gèrent-ils ou non les effets liés à la pollution ? En tenant compte à la fois des flux globaux et de la complexité des processus sociaux, environnementaux et techniques liés au recyclage du plomb, nos enquêtes ont pour objectif de saisir des agencements combinant des phénomènes physiques, des relations économiques, des dispositifs techniques, des collectifs d'acteurs humains ainsi que des modes de régulation politique, juridique et social.

A l'heure où le stockage de l'énergie électrique et la recyclabilité effective des métaux orientent les choix industriels au long cours, qu'avons-nous appris du plomb ? L'histoire longue d'un métal qui a accompagné nombre de développements technologiques (imprimerie, première révolution industrielle, automobile...), permet de disposer de nombreuses données, plus difficiles à réunir pour d'autres métaux (Lestel, 2003). L'ancienneté du recyclage industriel du plomb et sa diffusion depuis maintenant plus de 50 ans à l'échelle du monde, donnent la possibilité de décrire la diversité des processus techniques, et de comparer des configurations socio-écologiques de ressources et de contraintes qui gouvernent le développement des filières. La récupération et la transformation du plomb constituent un cas pour éprouver l'approche interdisciplinaire que nous expérimentons.

En partant de l'exploration ethnographique d'un cluster artisanal indien en bout de champ, cet article montre comment une enquête collective reconstitue plusieurs chaînes : des chaînes logistiques inversées en suivant de proche en proche les flux matériels du plomb ; des chaînes opératoires en décomposant l'ensemble des opérations efficaces sur la matière dans les ateliers et les usines ; des chaînes de contaminations en prélevant des échantillons de sols aux abords des lieux de production.

Interdisciplinarité Tout-Terrain

Lieu d'enquête : historique de l'implantation des ateliers de recyclage du plomb

Cette contribution s'attache à décrire l'enquête mise en œuvre sur le terrain de Bhojpur Dharampur, petite ville (31 305 habitants en 2011) de l'Etat de l'Uttar Pradesh dans le nord de l'Inde (voir Figure 1) et foyer d'un vaste cluster d'une vingtaine de sites de recyclage de batteries au plomb « en bout de champ ». Ici, les ateliers installés sur d'anciennes parcelles agricoles empiètent sur des terres encore cultivées. Ce terrain a été débusqué par une approche type *Follow the things* (Appadurai, 1986, Marcus, 1995, Cook, 2004), menée par le binôme indien de l'équipe, en remontant les filières de batteries usagées à partir de la région de New Delhi.



Figure 1 : Identification spatiale du cluster d'ateliers du recyclage de batteries au plomb de Bhojpur Dharampur, Uttar Pradesh, Inde

Plusieurs facteurs expliquent l'implantation du cluster dans cette petite localité. Bhojpur, de par sa position géographique, à l'intersection entre Delhi et la province densément peuplée de l'Uttar Pradesh (respectivement 17 et 200 millions d'habitants d'après le dernier recensement de 2011) bénéficie d'un flux suffisant de batteries hors d'usage ; d'une bonne desserte aux infrastructures de transports ; de la proximité des fabricants de batteries situés à la périphérie de Delhi ; de réglementations environnementales moins contraignantes que dans les zones urbaines ; et enfin d'un inépuisable réservoir de main d'œuvre, par la présence de minorités, qu'elles soient religieuses (musulmanes) ou de castes (*dalits*), cantonnées aux tâches et métiers les plus durs et dangereux. Ces ateliers se sont surtout développés par mimétisme. Suite au succès d'un premier entrepreneur local à la fin des années 1990, des agriculteurs ont vendu une partie de leur terrain pour établir leur atelier de recyclage de plomb.

En quelques années, entre 2000 et 2007, une quarantaine d'unités ont fini par s'agglomérer au même endroit, ce qui constitue une sorte de zone proto-industrielle spontanée, non planifiée et non contrôlée. Les émanations et les cendres, en contaminant les champs aux alentours, finirent par provoquer l'intoxication du bétail broutant autour des usines. L'activité et ses externalités polluantes sont dénoncées dès l'origine par les habitants de Baru Bhoora, village mitoyen peuplé de 822 habitants principalement *dalits*⁶, où les vents rabattent les fumées, poussières et odeurs des usines. Par l'intermédiaire d'un avocat et l'entremise politique de députés du parti *Bahujan Samaj Party*⁷ (BSP) alors au pouvoir et favorable aux *dalits*, l'affaire fut médiatisée (cf. Figure 2) et une équipe de vétérinaires fut dépêchée pour analyser les viscères des animaux décédés et prouver la contamination au plomb. Aux alentours du site, la pollution n'est plus à récuser, c'est devenu une conséquence

⁶ Le terme *dalit* (« opprimé ») est préféré à celui plus péjoratif d'« intouchable ». Les *dalits* sont à proprement parler exclus du système des castes, historiquement défavorisés, qui constituent respectivement entre 15 % et 7,5 % de la population indienne. (Cf. l'article « caste » du *Dictionnaire de l'Inde*, 2009, p. 150-156 (Clémentin-Ojha, 2009) ; voir aussi O. Herrenschmidt, « les intouchables et la République indienne », dans C. Jaffrelot (dir.), *L'Inde contemporaine*, Paris, Fayard, 1997)(Herrenschmidt, 1997)

⁷ Le *Bahujan Samaj Party* (BSP) est un parti politique indien de niveau national qui a été créé pour représenter les *Bahujans* (qui signifie littéralement « communauté majoritaire »), c'est-à-dire les castes et tribus répertoriées, les autres classes défavorisées (OBC) et les minorités religieuses.

inhérente à l'activité de recyclage du plomb : « l'industrie et la pollution, ou le chômage » comme pouvait l'écrire Zimmer à propos des brouillards toxiques de la vallée de la Meuse.⁸



Figure 2 : Coupure de journal local Metro du 9 février 2008 médiatisant les protestations des villageois. L'article est intitulé « Des villageois vivant dans une fumée mortelle. Des émanations d'acides des usines de batteries dans le village dalit de Baru Bhoora créent de fortes pollutions »

Fin 2007, l'activité des usines fut alors stoppée pour violation des normes environnementales édictées par l'agence environnementale, le *UP Pollution Control Board* (UPPCB). Dix-neuf usines localisées à moins de 500 mètres⁹ des habitations ont été définitivement fermées et relocalisées entre 30 et 50 km de là.

À partir de 2010, la reprise des activités fut à nouveau autorisée pour les vingt-et-une usines restantes. Un peu plus éloignées du village, elles sont parvenues à se mettre aux normes du UPPCB, grâce à l'installation d'une cheminée pour limiter les émanations et d'un « bag house » permettant la filtration des gaz collectés. Un raccordement électrique industriel leur a même finalement été octroyé en décembre

⁸ Autre époque, autre latitude : à la fin de l'année 1930, un épais brouillard nimbe l'Europe du Nord. Dans la vallée de la Meuse, les conséquences du phénomène sont tragiques : accidents, affections pulmonaires, décimation des élevages... Malgré la gravité de la situation, la réponse scientifique semble écarter l'hypothèse d'une pollution industrielle, et pourtant les « fumées, gaz et poussières » sont bien responsables des affections sanitaires accompagnant le phénomène, comme le montre Alexis Zimmer dans une passionnante contre-enquête pour comprendre « comment la vallée de la Meuse est (...) devenue un puissant générateur de brouillards mortels » (p. 25) » (Zimmer, 2017 cité par Lamy, 2019). Lire aussi l'importante historiographie des débordements industriels et de leurs conflits, qui pour certains se poursuit encore de nos jours (Letté, Le Roux, 2013) : « Plusieurs contributions de cet ouvrage nous invitent à mieux comprendre les ressorts de ces crispations qui mènent au conflit. À Viviez (Aveyron), Saint-Laurent-le-Minier (Gard) ou Noyelles-Godault (Pas-de-Calais), ce sont les reliquats, déchets et souvenirs des anciennes industries du plomb et du zinc qui refont surface. Dans les trois cas, il s'agit d'un même type de pollutions, par les métaux lourds, principalement le plomb et le cadmium, infiltrés dans le sol. Leur caractère cumulatif et néfaste pour la plupart des organismes vivants et en particulier pour l'homme donne aux pollutions un caractère rémanent, y compris plusieurs décennies après la fermeture des usines. À ce titre, les trois terrains d'étude ne se différencient pas forcément des dizaines de milliers d'autres sites pollués en France ». Et ailleurs...

⁹ La législation sur les dimensions de cette « zone tampon » reste peu clarifiée en Inde et dépend de l'interprétation de l'agence gouvernementale. En 2019, le Central PCB a édicté qu'une distance de 200 à 500 mètres était nécessaire autour des sites de gestion de déchets, et que cette zone tampon pouvait avoir un usage agricole. https://cpcb.nic.in/uploads/MSW/bufferzone_guidelines.pdf

2020, confortant ainsi leur régularisation. D'un recyclage artisanal d'arrière-cour, la zone d'activité des usines se professionnalise en devenant une zone industrielle reconnue par les institutions, malgré les émanations. Opérant auparavant de manière journalière, l'allumage des fourneaux se fait de nuit depuis 2010, ce qui permet de limiter un tant soit peu les conflits ouverts avec les villageois, la pollution manifeste étant hypocritement reléguée hors de la vue de tous.

Enquêtes ethnographiques : au cœur des ateliers de recyclage du plomb

Les 21 ateliers de Bhojpur sont d'une grande homogénéité dans leur conception et dans la conduite des opérations. Ils consistent en des fours auto-construits en brique réfractaire (cf. Figure 3), assurant une production mensuelle de 50 tonnes de plomb par atelier (soit 1000 tonnes/mois au niveau du cluster) par une quinzaine d'ouvriers en moyenne par atelier, la plupart provenant des villages voisins. Aucun appareil de mesure n'aide au pilotage des opérations, que ce soit pour la mesure de la température ou du débit d'air le traversant, ou encore pour l'évaluation de la qualité des lingots de plomb, qui repose d'ordinaire sur des moyens d'analyse permettant par exemple de déterminer la pureté du métal.



Figure 3 : (gauche) Photographie d'un four auto-construit utilisé dans un atelier du cluster de recyclage de batteries au plomb de Bhojpur, avec l'approvisionnement en air, la porte du four, le trou de coulée et le creuset (droite) Stock de lingots de plomb après coulée

À ce stade, l'enquête ethnographique se donne pour objectif de documenter le principe de fonctionnement d'une unité représentative du cluster en comparant et en recoupant les phases, les séquences et les opérations communes qui les constituent (Figure 4). En contexte ethnographique, chaque étape du processus technique doit être documentée au moyen d'une grille à plusieurs entrées. Les principales entrées du protocole comprennent 9 éléments : lieux, acteur(s), savoirs et savoir-faire, matière(s) première(s), action(s), outil(s), relations avec d'autres activités, organisation, croyances (Gosselain, 2019). Celle-ci permet une collecte systématique des éléments constitutifs des actions techniques en vue d'analyses et de comparaisons ultérieures (anthropologie), mais aussi en vue de mener à la construction de modélisations, voire à la caractérisation de ces procédés (génie chimique). La première étape est de parvenir à obtenir l'autorisation de pénétrer et de rester dans l'enceinte d'un atelier, un accès qui n'est pas toujours aisé du fait de la suspicion de certains propriétaires ou de l'intéressement d'autres (demande de rétribution).

Les batteries hors d'usage arrivent sur site préalablement collectées par les revendeurs. Elles sont ouvertes par les ouvriers lors de la première rotation (unité de découpe du temps de travail à l'issue de laquelle une autre équipe relève celle en poste) sur les trois que comporte chaque journée (une de préparation – 08h -16h – et deux de fusion – 16h-00h et 00h-08h). Cette première étape de ségrégation manuelle, réalisée au moyen d'une hache, permet d'en extraire les électrodes constituées de plomb. L'enveloppe en plastique (polypropylène) est, elle, mise à part pour être revendue par ailleurs. Les électrodes sont ensuite isolées des séparateurs de plaques, puis sont entassées en vue des deux rotations

suivantes. Afin d'identifier au mieux les pratiques, les connaissances et leur adéquation, nous avons assisté aux huit heures de fusion, en relevant la nature et en décomptant le nombre et la fréquence des pelletées introduites dans le four. Cette observation se réalise dans des conditions rendues difficiles par les vapeurs toxiques s'échappant du four et par le vacarme produit par le souffleur d'air, tout en suscitant la curiosité des travailleurs, et parfois leur hilarité.

Tout au long de la rotation, le trou de coulée qui relie le four au creuset est successivement bouché avec un sac en toile de jute au bout d'une tige métallique, puis débouché pour laisser le plomb liquide s'écouler dans le creuset. À l'issue de ces phases répétées et seulement lorsque le creuset est rempli, le four n'est plus approvisionné et la combustion est stoppée. La phase de lingotage peut être initiée. Tout d'abord, l'interface solide qui s'est formée entre le plomb liquide et l'atmosphère, que l'on nomme laitier, est retirée au moyen de tiges et de l'effet de levier. Le plomb est alors versé dans des moules de lingots grâce à des louches à long manche. Le produit final obtenu est un lingot de plomb de 25 kg environ et d'une pureté déclarée de 97%.

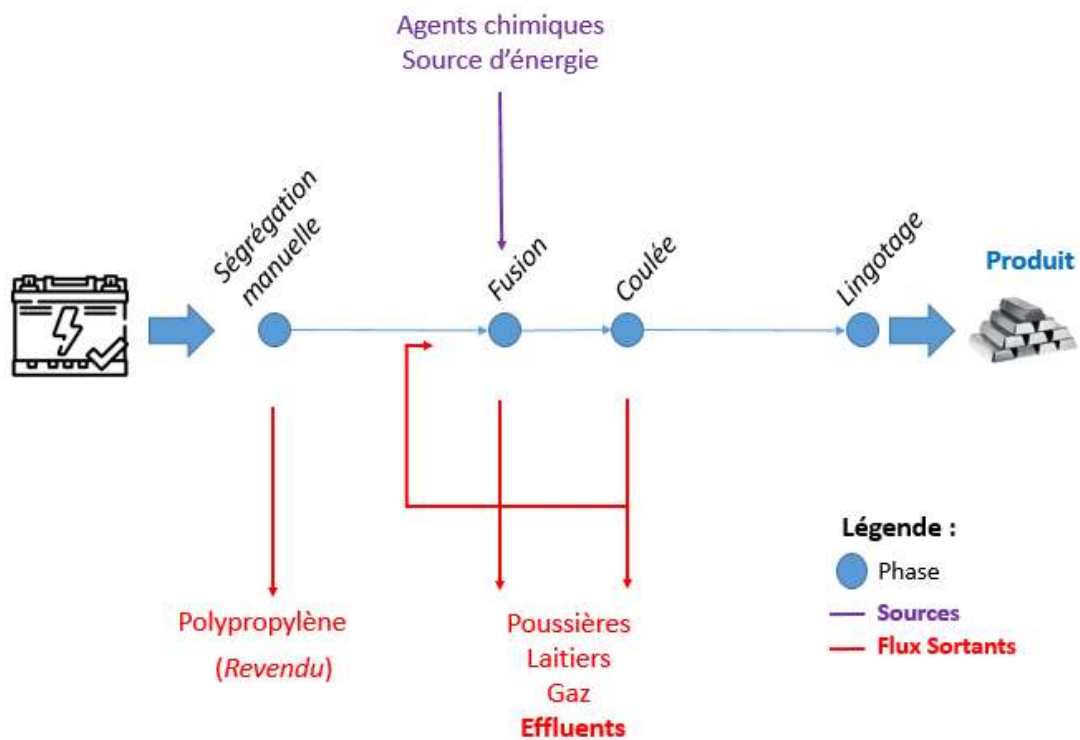


Figure 4 : Chaîne opératoire, au niveau de la phase, d'un atelier de recyclage de plomb du cluster de Bhojpur de la batterie usagée jusqu'au lingot avec les flux entrants et sortants de matières et d'énergie.

Procédés et bilan de matières dans l'atelier

Température, pression, quantité des charges plombeuse ou charbonneuse... comment faire un bilan quand aucune comptabilité des matières entrantes n'existe ? Comment le « maître », au sens de dépositaire de l'autorité technique, aussi appelé *maestri*, pilote-t-il la transformation du plomb sans instrumentation de mesure et de régulation ? Comment comprendre ce qu'il fait, quand il le fait ? Comment accéder à ce qu'il sait ?

Dans l'atelier « National Metal Traders », comme dans les autres, le savoir tacite prévaut et la part d'autorité du *maestri* (l'ouvrier qualifié) vient du fait que les maîtres voient ce que les autres ne voient

pas. L'atelier, cet espace productif dans lequel les gens traitent en face à face des problèmes d'autorité (Sennett, 2010), constitue le site principal de notre enquête. Nous avons pris place dans cet atelier particulier le temps de deux rotations complètes sous la supervision méfiante du fils du propriétaire. Après une série de repérages et d'observations flottantes en 2019¹⁰, il s'agit d'y suivre, *in situ*, la chaîne opératoire de la transformation du plomb. Concrètement, il nous faut nous approcher sans gêner le travail des corps et la circulation minutée des matières, s'accroupir et interroger sans heurter les gestes et la susceptibilité du patron, compter les pelles et les ouvertures du four sans en rater une, chronométrer les intervalles, les noter, consigner les écarts... De temps à autre, à tour de rôle, nous sollicitons nos interlocuteurs pour réaliser des croquis, ou confirmer une observation par un schéma.

Le relevé de la température, qui nécessite d'introduire l'embout du capteur dans le métal en fusion, se fait également avec l'aide des opérateurs, habitués à subir l'écrasante chaleur émanant de celui-ci. Enfin, il nous faut collecter des échantillons de matières à chaque stade du procédé. Au total, l'ingénieur de l'équipe aura prélevé 17 échantillons rassemblant des batteries usagées, des agents chimiques, des morceaux de scories et de cendres ainsi que des prélèvements du plomb produit, avec l'assentiment du patron. D'une expérience dans les ateliers se dessinent quelques conclusions sur les vertus et les limites de la pratique du terrain en équipe. Si les protocoles d'enquêtes ont été discutés en amont, ils se bousculent sur le terrain, chacun s'essayant aux différentes méthodes. L'entretien frictionne, la question de l'un pouvant empêcher une autre ou donner une direction inattendue à l'échange. Lorsqu'elle est menée à plusieurs de façon concomitante, l'observation en revanche est plus construite, en même temps que l'attention est moins flottante : l'un des chercheurs attire l'attention de l'autre, propose en cours de route une interprétation, précise ou recoupe une information, etc. Les différents points de vue peuplent le champ de détails pertinents supplémentaires. Surtout, l'observation commune autorise des degrés d'engagement et de désengagement différentiels. Il est possible de moduler davantage la focalisation du regard, grâce à la redistribution, au gré des circonstances, des tâches. Celles-ci s'avèrent activement complémentaires : parler permet aux autres de se taire, comme une relance de la conversation lui permet de noter une idée ; rester avec un interlocuteur privilégié donne aux autres la liberté de sortir du champ, pour s'abstraire de propos de pure convenance, prendre une photo, vérifier quelque chose en passant. En aval, chaque membre tient un journal personnel qu'il partage lors de debriefs quotidiens. De retour au laboratoire la collecte d'informations est centralisée de façon à produire un journal collectif, agrégé et consolidé, qui forme une base de connaissances communes.

¹⁰ Une première mission collective de terrain s'est déroulée en novembre et décembre 2019. L'équipe interdisciplinaire, constituée de Paul Lhoste, doctorant en génie des procédés, Bertrand Jouve, mathématicien, Remi de Bercegeol, géographe, Shankare Gowda, politologue, Yann Philippe Tastevin, anthropologue, a pu pendant 6 semaines effectuer une dizaine de visites de sites, artisanal ou industriel, de recyclage de ferrailles (aciérie), de plomb (usine), d'aluminium, de laiton.

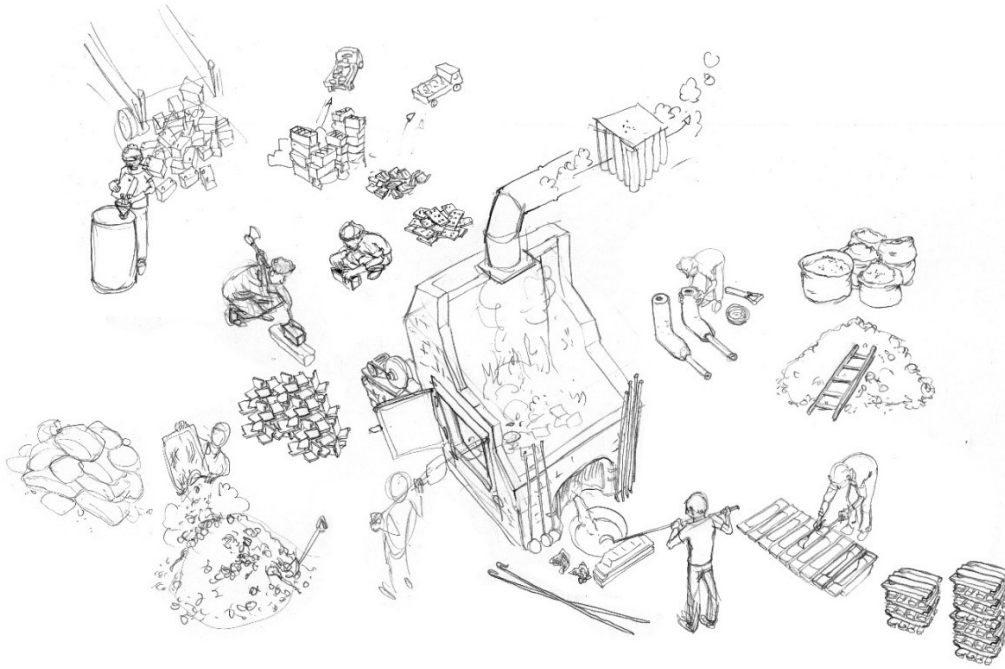


Figure 5 : Crayonné de l'atelier National Metal Traders du cluster de Bhojpur par Bastien Massot. Première esquisse sur la base d'un corpus photographiques de terrains et d'entretiens avec l'équipe de recherche. [© Massot, 2022]

Maître ou assistants, les hommes affairés ne répondent pas à nos questions, la montée en température du four commande la cadence des pelletées. L'effort et l'attention des ouvriers ne doivent pas être détournés par notre présence. Le patron se préoccupe de la productivité (ou de l'ardeur au travail) de ses employés, tandis que notre équipe se divise en deux et prend place dans l'atelier. Une partie s'enquiert auprès de lui de l'histoire de la petite entreprise familiale tout en recoupant les informations recueillies ailleurs sur la fondation et l'économie du cluster. Au four et creuset, l'autre partie, carnet à la main, se concentre sur l'enregistrement systématique des charges (cf. Figure 6). Ce travail de comptabilité des matières rentrantes dans le four est indispensable aux ingénieurs qui ont besoin de quantification précise pour décrire et analyser le cœur des procédés utilisés. Les comptages s'appuient sur une unité-étalon : la pelletée, consistant en la mesure de la masse moyenne d'une pelle chargée en charbon, matière plombeuse ou autre réactif. Vient ensuite le décompte des pelletées enfournées, de la nature de la matière ainsi que du moment avec lequel elles coïncident. De ce comptage, il est possible d'évaluer un stock associé à une production de plomb et donc d'estimer d'une manière plus précise, des indicateurs partiels du procédé comme le rendement, le coût de production ou la quantité de gaz à effet de serre émise par kilo de plomb produit.

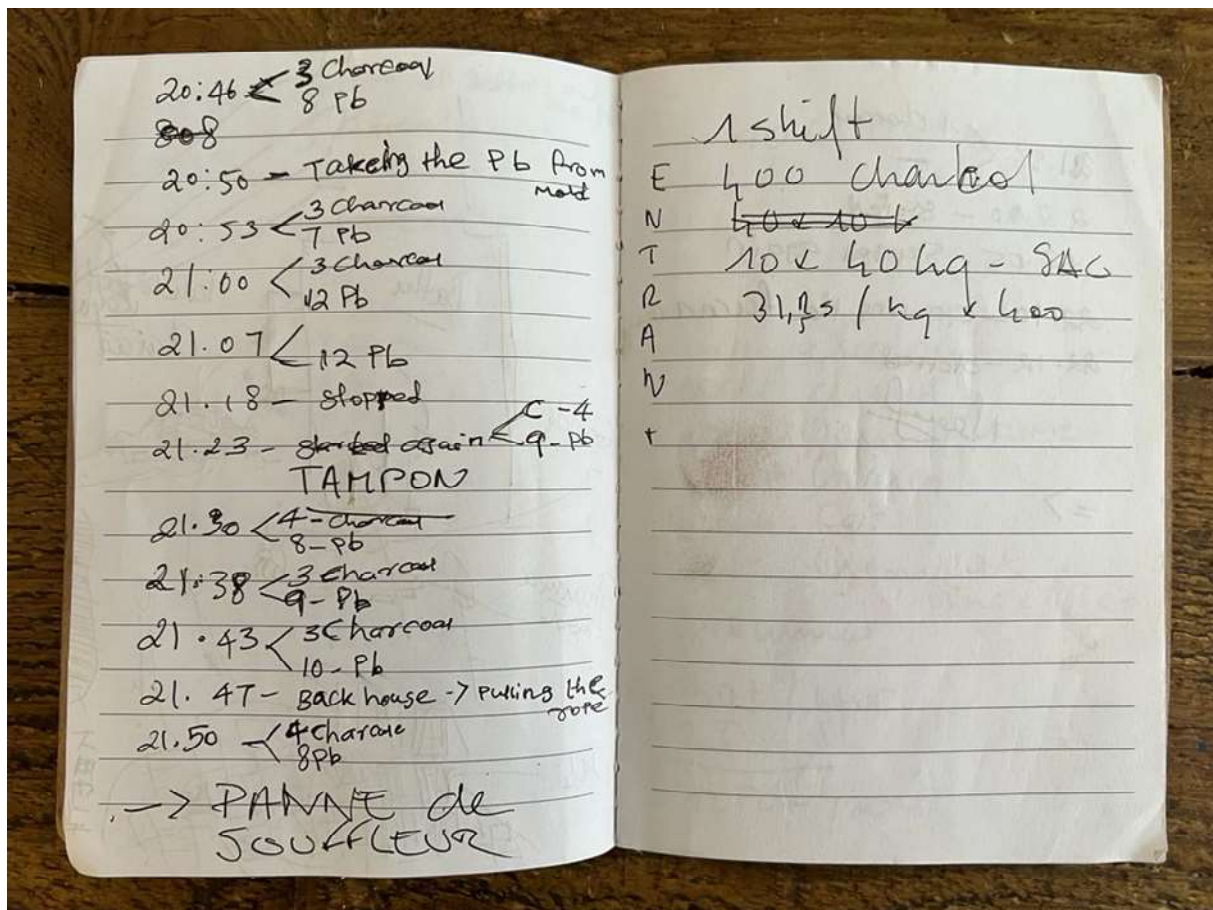


Figure 6 : Horodatage des pelletées (extrait de Carnet, 19 novembre 2021)

L'opération restant le niveau privilégié pour appréhender le geste technique efficace et les idiosyncrasies (Buob, Chevallier et Gosselain, 2019), l'anthropologue photographie chacune des opérations et filme l'enchaînement des séquences. Cette observation minutieuse offre un premier accès aux savoirs et savoir-faire des personnes impliquées et permet d'en identifier le niveau d'expertise ; elle doit néanmoins être complétée par des entretiens. Le maître, peu loquace, accepte finalement de donner un numéro de téléphone. Un rendez-vous est pris dans son village, le surlendemain, jour de relâche.

Co-production de la connaissance par partage de savoir-faire

Vipin, le *maestri*

A Nakatpuri Khurd, dimanche c'est jour de mariage. Nous tentons de joindre notre interlocuteur. Sa moto est là, mais le numéro de téléphone appartient à son frère : « Il est parti, vous ne pourrez pas le rencontrer ». Nous comprenons qu'il n'a jamais voulu nous revoir quand Vipin, 30 ans, un voisin natif du village lui-même *maestri* vient à notre rencontre. Fort de ses dix ans d'ancienneté dans le métier, il est prêt à partager son expérience. Vipin a travaillé dans tous les ateliers de Bhojpur, il y a occupé tous les postes, exécutant les tâches subalternes, pénibles ou répétitives. A la casse d'abord, il aide à décharger les camions puis trie et range le stock, participe ensuite au démantèlement des batteries usagées. Il prépare en journée le tas de plomb (*plates*) qui sera fondu et lingoté en soirée. Se rapprochant du four, il nettoie régulièrement le creuset de ses scories, manipule progressivement les leviers en acier durci (*sambhal*), prépare le tampon en toile de jute (*patta*). Un apprentissage qu'il résume ainsi : « j'ai commencé à 60 roupies par jour, j'en gagne 500 aujourd'hui » (entretien du 21 novembre 2021). Les nouveaux arrivants développent une compréhension de la pratique à partir d'opportunités de participation d'abord périphérique puis de plus en plus centrale : *apprentice-helper*, puis *helper*, plus *apprentice-maestri*, puis *maestri*. L'enjeu de cette participation périphérique légitime, c'est l'accès à

des pratiques qui sont au cœur de la communauté des artisans-fondeurs de Bhojpur. Vipin est fier de son savoir-faire, il s'identifie par ce qu'il fait et accepte de partager ce qu'il sait et de contribuer à l'éducation de notre attention en marge de la cérémonie de mariage.

L'itinéraire technologique selon Vipin

Le dispositif est simple. 36 opérations ont été isolées lors de 6 séquences filmées par l'anthropologue de l'équipe¹¹, suivant un déroulement chronologique et impliquant des transformations visibles ou invisibles, et sont affichées sur un ordinateur portable. Durant le visionnage, Vipin reconnaît les séquences, ses réactions sont d'abord gestuelles avec des signes de curiosité, d'amusement, d'autres d'étonnement, de perplexité ou d'approbation, il commente, pas à pas ce qu'il voit, répond à nos questions de précisions par l'intermédiaire de notre collègue politologue Shankare Gowda et interprète pour l'occasion.

Affinant le découpage de la séquence de l'allumage, il pointe l'importance de toute une série de vérifications préalables, il insiste sur la responsabilité qu'il a en partage entre deux fournées avec son homologue sur l'état de fonctionnement du four avant, pendant et après la fonte.

Image par image, il explique. Le « mille-feuille » initial fait de plomb et de charbon, puis la montée en température du four porte ouverte pendant quinze minutes, le souffleur au maximum de sa puissance, la fermeture de la porte puis cinq minutes plus tard du trou de coulée avec un tampon de toile de jute pour « augmenter la pression ». Le premier chargement au bout de vingt minutes, puis l'alternance toutes les 4 à 6 minutes des pelletées, l'ouverture de la porte à intervalles réguliers qui permet alors de faire baisser la pression dans le four. Images animées et commentées à l'appui, on comprend sur quels éléments se focalise son attention. La surveillance de la température s'effectue par un contrôle visuel de la charge dans le four. Les assistants y jettent un œil par intermittence, une attention redoublée par la vigilance du maître qui apprécie constamment la fluidité de la coulée. Image par image, Vipin nous transmet les repères sensibles qu'il s'est forgés par l'expérience. Une acuité visuelle qui lui sert d'indicateur pour « lire » la coulée. La vitesse d'écoulement de plomb liquide est l'indice d'un fonctionnement normal, sinon optimal, du four. En visionnant nos images de la fusion (les métadonnées de la vidéo indiquent 20h22, soit presque 4 heures après le démarrage de la rotation), il détecte une anomalie. Il constate un ralentissement « anormal » du flux imperceptible à nos yeux. Il diagnostique à distance une panne du souffleur que nous avons constatée bien plus tard. Ce soir-là, le coude façonné en argile par le *maestri* pour souffler l'air dans le bas du fourneau s'était effectivement brisé, ce qui a occasionné une baisse de température, donc du débit qui écourta le remplissage du creuset et diminua d'autant la quantité de lingots moulés.

La coulée doit être continue. Le principal repère du *maestri* est sa vitesse : « Not to get jam »¹² guide l'attention et commande l'effort coordonné du *maestri* et des *helpers*. S'ensuit tout un travail d'explicitation de la gestuelle et de traduction d'un tour de main. Pour empêcher la formation trop rapide de scories (*keeta*), le maître utilise des « fondants », des résidus de fer qu'il peut jeter dans le four jusqu'à une vingtaine de reprises par rotation. Le bas fourneau en briques réfractaires ne doit surtout pas s'encrasser. Un four qui se « serre » suppose sa reconstruction : c'est deux jours d'arrêt de la production de plomb, un contretemps redouté par tout propriétaire d'une fonderie.

Le milieu des fondeurs est riche de savoir-faire empiriques dans le domaine de la chimie mais, tout comme l'anthropologue, ils seraient en peine pour les expliciter. Le recours à l'observation directe des pratiques, les entretiens *in situ* avec les maîtres-artisans, qui pour certains s'appuient sur des séquences filmées pour être sûr de ne pas rater d'étapes¹³, ont permis de situer les expériences et d'affiner la

¹¹ Equipé d'un Lumix G9 (vidéo 1920x1080) et d'un Zoom H5.

¹² Transcription brute ici, littéralement : « Ne pas former de bouchon ».

¹³ Sur les vertus et des limites d'un dispositif de vidéo-élicitation (Fournier et Cesaro, 2020). Voir aussi la démarche par entretien d'autoconfrontation (Theureau, 2010).

description des chaînes d'opérations (Figure 7), l'entrée de la matière dans le four et ce qu'il s'y passe à l'intérieur constitue un seuil qui pour être franchi implique un changement d'échelle.

Phase de fusion – Séquence démarrage du four

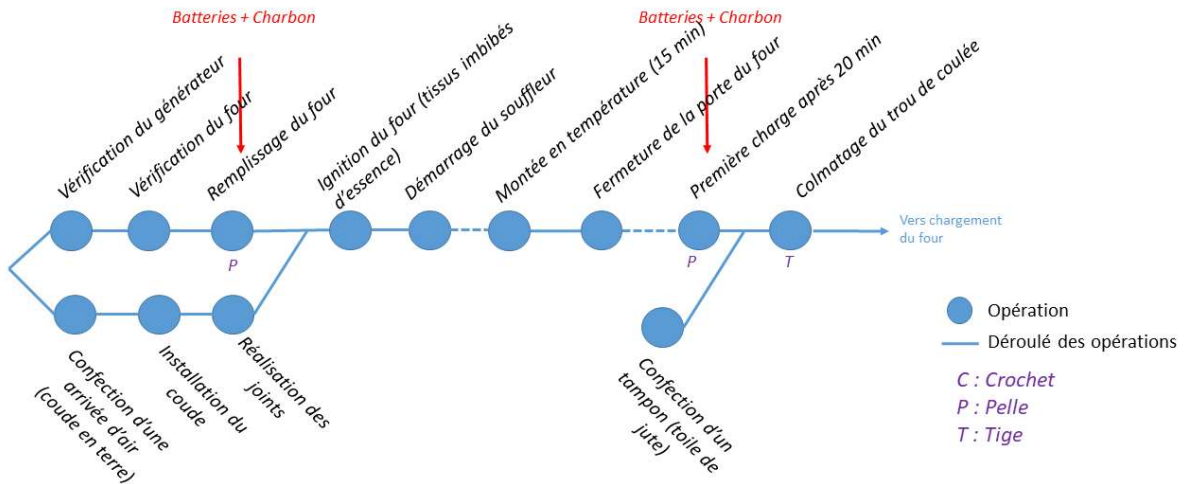


Figure 7 : Schéma illustratif d'une chaîne opératoire : la séquence de démarrage du four par opération d'un atelier de recyclage du cluster de Bhojpur.

C'est donc ici que notre démarche interdisciplinaire prend tout son sens avec le recours aux méthodes du génie des procédés pour ouvrir cette boîte noire pour la description ethnographique. L'enjeu est d'étudier le cœur des procédés de recyclage tels qu'ils sont mis au point et pratiqués, d'explicitier les savoirs implicites des acteurs et de mettre en relation l'analyse des filières de recyclage de métaux avec la composition des phases dans lesquels ils se matérialisent, par l'intermédiaire de la modélisation thermodynamique (Figure 8).

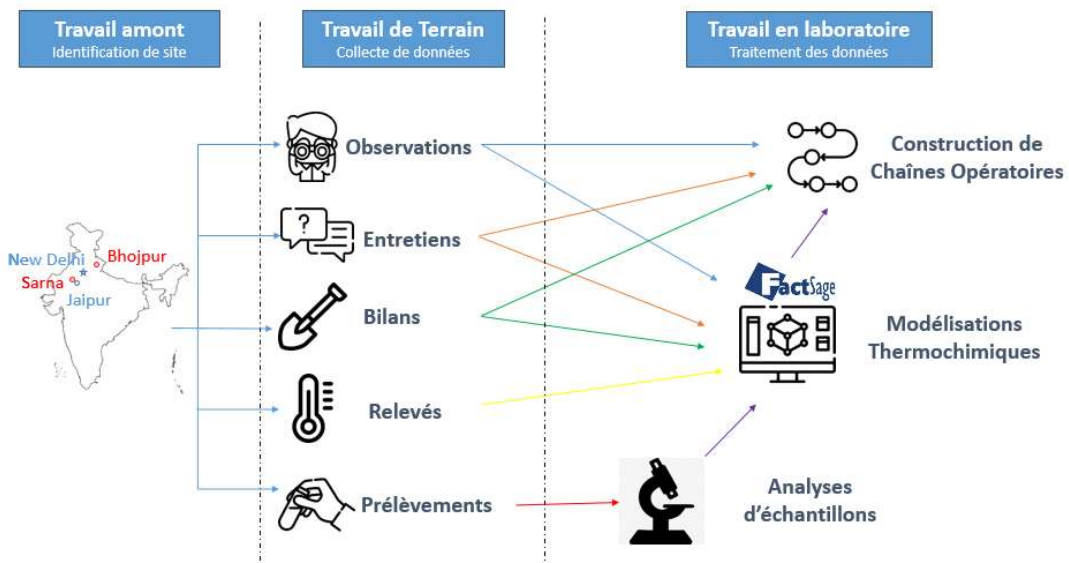


Figure 8 : Schéma synthétique de la méthodologie interdisciplinaire mise en œuvre au cours de ce travail.

De la batterie usagée au lingot de plomb : aspects chimiques du procédé de transformation (ou l'alchimie inversée)

Comme mentionné plus haut, le recyclage du plomb des batteries passe par la transformation chimique de diverses formes sous lesquelles il se trouve : oxydes et sulfates. La conduite de ce type de réaction nécessite de se placer dans des conditions précises de température, avec un apport régulier en carbone et en air, afin de produire le plomb le plus pur possible (i.e. contenant le minimum d'oxygène et de soufre). Pour en évaluer les performances, il est donc nécessaire de connaître au mieux les conditions opératoires, notamment grâce à la mesure de la température dans le four et à la quantification des éléments présents dans les batteries usagées.

Pour une température proche de 900°C, relevée directement dans le four à l'aide du thermocouple, les calculs montrent qu'il se produit une réduction des oxydes de plomb en présence de charbon (composé principalement de carbone) se combinant à l'oxygène de l'air soufflé dans le four pour former du dioxyde de carbone (CO₂). De même, le modèle montre la désulfuration du sulfate de plomb par capture par le carbone (issu du charbon) de deux des quatre atomes d'oxygène que contient le sulfate de plomb, rendant *de facto* le soufre plus stable sous forme de dioxyde de soufre (SO₂) gazeux qui s'évacue avec les fumées. Si les quantités de charbon ne sont pas suffisantes, ou sont en excès, si le four manque d'oxygène, si le métal en fusion est mal mélangé, etc., alors ces réactions ne se produisent pas complètement et le plomb produit contient des quantités significatives d'oxygène, de soufre, de fer, de silice (provenant des éléments réfractaires du four), ou encore d'autres polluants, ce qui réduit sa pureté et donc sa valeur marchande. L'enjeu, dans un atelier artisanal comme dans une usine disposant d'instruments de mesure et de contrôle de la qualité, est de maintenir les conditions dans une fenêtre opératoire optimale pour produire la matière la plus pure possible avec un rendement le plus élevé possible : c'est par conséquent un défi immense que relève un atelier artisanal et dont nous cherchons à comprendre le fonctionnement.

Notre étude du procédé de préparation du plomb montre que les opérations d'ajouts de charbon, de soufflage d'oxygène, de montée en température (bien au-delà de la température de fusion du plomb métal) pratiquées dans les ateliers sont justifiées par la nature des réactions chimiques à réaliser. Les calculs indiquent que, dans les conditions dans lesquelles fonctionnent ces ateliers (notamment la température et la quantité de carbone ajoutée), il est possible de produire du plomb avec une pureté comprise entre 97 % et 99 %. Ces valeurs correspondent à la pureté déclarée par les opérateurs et gérants d'ateliers (environ 97%). En revanche, nos analyses, réalisées sur quelques échantillons de plomb prélevés dans les ateliers, indiquent une pureté bien inférieure, de l'ordre de 90%. Cet écart, important, laisse envisager que, du fait de la conduite artisanale du procédé, la pureté du métal produit est sujette à une forte variabilité : si quelques lots atteignent la pureté optimale (c'est-à-dire celle atteignable si tout se passe au mieux et que l'ensemble des réactions chimiques se produit complètement), d'autres sont de bien moindre qualité. Malgré l'écart entre la valeur de pureté annoncée par les opérateurs et celle mesurée dans notre laboratoire, l'ensemble du processus reste néanmoins remarquable car le plomb, produit dans des conditions très rustiques avec un contrôle uniquement visuel de la marche du four et une alimentation par valeurs discrètes (pelletée par pelletée), possède une valeur marchande finale auprès des affineurs et industriels.

Second exemple de notre démarche interdisciplinaire, un autre atelier étudié au cours de nos enquêtes sur le site de Sarna dans la région du Rajasthan se situe dans un parc industriel de la périphérie de Jaipur où de petites fonderies côtoient des ateliers équipés de fours rotatifs (*rotary furnace*) de plus grande capacité et permettant un meilleur mélange des différents éléments et donc un meilleur déroulement des réactions chimiques. Dans l'une des affineries, les ouvriers ajoutaient, en plus de la charge plombeuse et du charbon, des pelletées d'une poudre difficilement identifiable. L'analyse de cette poudre au laboratoire a permis son identification, en l'espèce de la limaille de fer. La modélisation thermochimique confirme que l'utilisation de fer aide à désulfurer davantage la charge plombeuse grâce à la formation

de sulfure de fer, ce qui améliore la pureté finale des lingots de plomb, tout en réduisant de manière significative les rejets de dioxyde de soufre (gaz toxique et nocif pour l'environnement). L'utilisation de limaille de fer, sous-produit bon marché d'ateliers de métallerie, facilement accessible et disponible, présente l'avantage d'une large surface de contact avec le métal liquide et donc accélère considérablement la réaction de désulfuration. Cette interprétation a par la suite été confirmée au cours d'un entretien avec l'ancien responsable de la production d'une société de recyclage de plomb française, nous expliquant que cette méthode était parfois appliquée au sein de leur site toulousain¹⁴.

L'analyse du point de vue de la science des procédés confirme au final que les gestes observés et leur ordonnancement possèdent des justifications très précises et sont le résultat d'une optimisation contrainte (matériaux disponibles localement et de faible valeur marchande comme le charbon ou la limaille) et d'un accès limité à des instruments de mesure (remplacés par l'œil du maître).

Les sols agricoles comme marqueurs de contamination

Les rencontres avec les travailleurs du plomb ont par ailleurs engendré des discussions autour de la dangerosité de l'activité, notamment lorsque les ouvriers refusaient les quelques masques que nous leur proposons. A l'intérieur des ateliers, nous étions nous-mêmes exposés à la chaleur, aux fumées. A l'extérieur, les habitants de Baru Bhoora affectés par les maladies à répétition de leurs proches et du bétail, nous interpellent. Notre première visite donne lieu à une réunion spontanée, les habitants veulent savoir et faire savoir ce qu'ils subissent, y exigent que l'air qu'ils respirent, les sols qu'ils cultivent, l'eau qu'ils consomment soient analysés. Au sein de l'équipe, les points de vue, non dénués d'une certaine émotion, diffèrent sur les réponses à donner et plus généralement sur la marche à suivre. D'autant plus qu'à ce stade, il n'y a pas de spécialistes de la mesure environnementale dans l'équipe.

Comment l'activité de recyclage de métaux génère-t-elle localement des contaminations, ayant peut-être des conséquences sur la santé des habitants ? L'enquête se ramifie alors encore pour analyser les interactions entre la mobilisation de dispositifs techniques, artisanaux ou industriels, de récupération et de transformation de la matière et les processus de contamination du milieu et des corps. Fort de l'interdisciplinarité qui s'initie dans le système de recherche français, et plus spécifiquement entre les laboratoires du site toulousain, à nos investigations sur l'économie locale du recyclage des batteries, nous avons pu associer des prélèvements de matières et de sols. Nous avons réalisé une collecte d'échantillons de sols¹⁵ avec l'accompagnement et l'aide des villageois. Pendant une journée, nous avons effectué 138 prélèvements dans les champs de canne à sucre plantés entre le cluster et le village mitoyen de Baru Bhoora, avec un pas de maillage de l'ordre de 30 mètres. Alors qu'une partie de l'équipe avait déjà séjourné durant une semaine dans les ateliers, que nous avons effectué la veille une rotation complète, nous voilà de l'autre côté du mur, assistés par des jeunes du village, équipés de cuillères, de sachets et de tubes en plastique. Cette coprésence, dans la proximité étroite des usines et du hameau qui caractérise la zone, introduit une difficulté nouvelle sur le terrain saisi dans sa globalité. Comment fait-on concrètement pour enquêter simultanément sur deux aspects de l'activité du recyclage ? L'observation du processus technique avec les travailleurs et leurs patrons et l'évaluation environnementale de la fonte avec les riverains ? N'est-on pas en train de trahir la confiance du propriétaire de l'usine ? Sans être certains des attentes des habitants ?

A la fin de cette journée, au bout de huit heures sans interruption d'échantillonnage, alors que nous sortons de la dernière parcelle pour regagner la route, arrive une moto à notre hauteur. Regard noir du chauffeur qui transporte le patron qui nous a accueillis la veille. Malaise. Ils repartent en trombe. Nous

¹⁴ Entretien du 02/11/2021 avec M. Philippe Pradère, anciennement directeur de production de l'usine de la STCM à Toulouse spécialisée dans le recyclage des batteries (<https://www.stc-metaux.com>).

¹⁵ Sous la supervision de Méлина Macouin du Laboratoire de Géosciences de Toulouse, en vue d'une analyse de la composition chimique des terres agricoles limitrophes du cluster, par Dr. Sambuddha Misra du Centre for Earth Sciences de l'Indian Institute of Science de Bangalore.

retrons épuisés. Nous irons le lendemain discuter. Sur le chemin du retour, des échantillons de sols sont également prélevés à des distances de 5 et 10 km pour relever la teneur en plomb de ces sols témoins, hors de toute influence du cluster afin d'estimer le fond géochimique caractéristique de la zone. Des analyses de géochimie et de propriétés magnétiques sont réalisées en laboratoire.

Les premiers résultats de cette étude d'impact environnemental indiquent des teneurs en plomb dans le sol qui atteignent 4757 ppm¹⁶ aux abords des ateliers et décroissent avec la distance pour atteindre une valeur minimum de 54 ppm au niveau du village (Figure 9). La quasi-totalité des échantillons présentent des teneurs supérieures à 100 ppm à comparer aux 60 ppm de moyenne des échantillons témoins (plage de 48 à 69 ppm), ce qui prouve le caractère anthropique du plomb. Plus de 30 prélèvements contiennent des taux de plomb supérieurs à 400 ppm qui est le seuil d'alerte de l'agence de protection de l'environnement américaine pour la pratique agricole (EPA, 2020). En considérant cette teneur seuil, les données indiquent qu'une zone de 300 mètres autour du cluster est contaminée de manière importante par l'activité des fonderies.

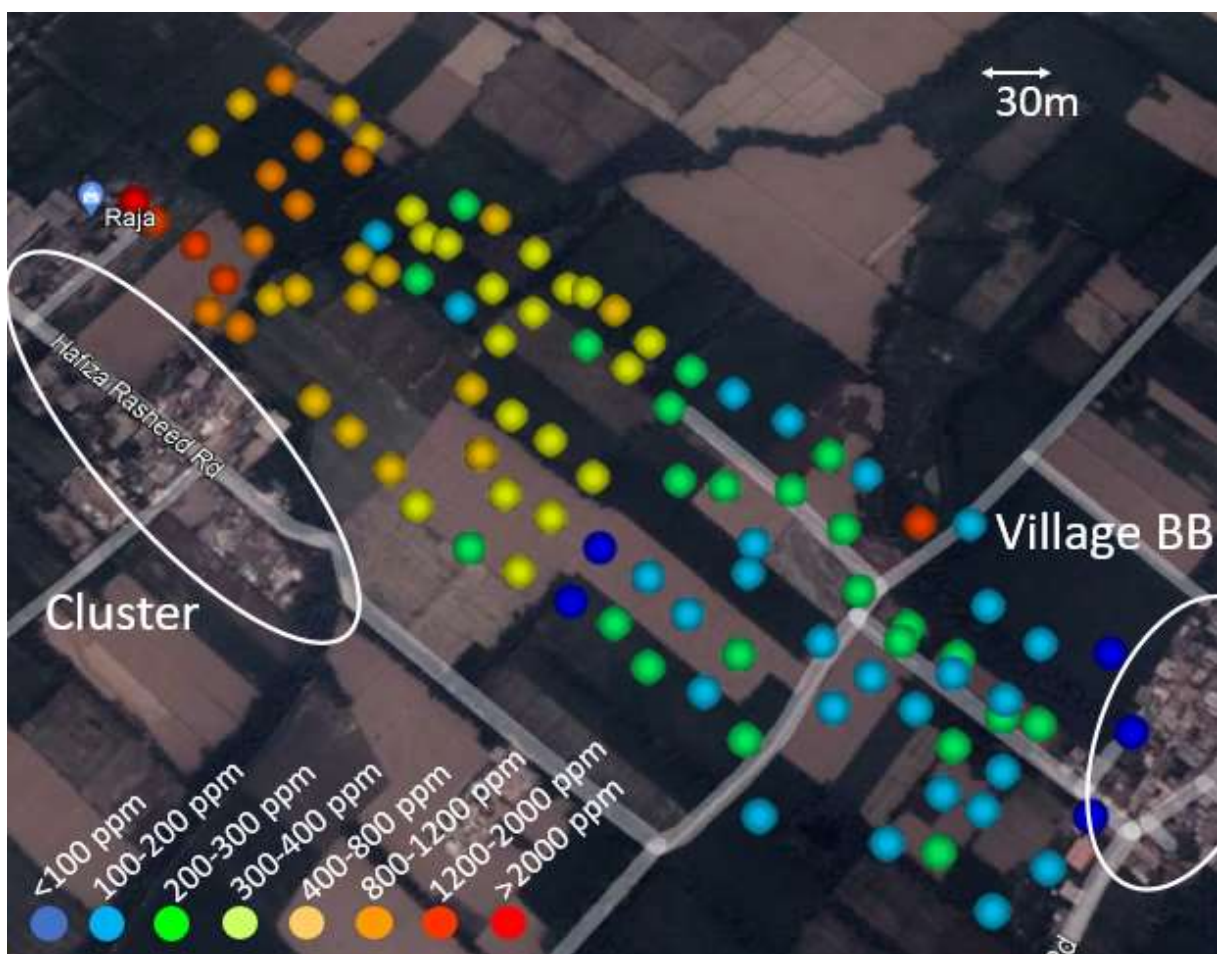


Figure 9 : Cartographie semi-quantitative de la teneur en plomb autour du cluster indien de Bhojpur (20 ateliers) ; 138 prélèvements espacés de 30 m (moyenne) ; 30 points > 400 ppm (orange) seuil d'alerte de la concentration du plomb dans le sol.

¹⁶ ppm : Partie par million, ou milligramme par kilogramme.

Discussion

L'enjeu initial était de jouer du contraste épistémique entre sciences physiques et sciences humaines et sociales avec l'idée qu'en complétant nos boîtes à outils, qu'en ajustant leur usage lors de l'enquête, nous pourrions documenter les savoirs et savoir-faire sur lesquels s'appuie chaque action technique, d'explicitier les conceptions vernaculaires et les principes physiques impliqués dans le traitement du plomb, pour comprendre de quelle façon les opérateurs pilotent la transformation de la matière. Outre la compréhension et la quantification des procédés artisanaux de recyclage des métaux, l'analyse physique et chimique guidée par la décomposition en gestes élémentaires permet de mieux comprendre le processus de valorisation de la matière (ici le plomb) mais aussi d'en suspecter les effets et mesurer les contaminations à l'intérieur comme à l'extérieur des fonderies artisanales.

L'approche interdisciplinaire permet d'identifier des contraintes auxquelles se soumettent par la force des choses les opérateurs d'ateliers pour optimiser leurs pratiques. L'analyse de leurs procédés montre qu'ils opèrent dans des conditions proches d'un optimum théorique qui néglige cependant les impacts sanitaires et environnementales. Si l'étude montre que des efforts ont été faits à la suite des actions fortes de fermetures d'usines, pour limiter ces impacts, nos travaux illustrent que beaucoup reste à faire dans ce domaine. L'analyse géochimique met en évidence qu'au-delà des gaz produits par la conversion des sulfates de plomb (SO₂), les fours émettent aussi des fumées (dispersions de particules dans les gaz chauds qui s'échappent des fours), qui entraînent du plomb dans l'atmosphère et finalement une pollution des sols à proximité des ateliers.

La remise en circulation des métaux s'inscrit dans des réseaux d'échanges de matières locaux et mondiaux, gouvernés par des contraintes économiques, avec des enjeux technologiques forts ayant parfois des conséquences environnementales lourdes pour les populations riveraines. A Bhojpur comme dans de nombreuses autres régions de l'Inde, les groupes sociaux les plus défavorisés vivent dans les environnements les plus dégradés (Larrère, 2009, Goreau-Ponceaud et Ponceaud-Goreau, 2020). Petits patrons musulmans, ouvriers et paysans cohabitent, travaillent et s'affrontent. S'y développe un écologisme des pauvres (Alier, 2014) créant un clivage et un conflit latent entre la population paysanne exposée aux pollutions et ceux qui bénéficient d'emplois dans les ateliers du cluster. Un antagonisme dans lequel nous sommes pris *de facto*, l'enquête se déployant de proche en proche, du four au champ.

Malgré le risque sanitaire, ces usines sont intégrées à la chaîne économique de valorisation de la batterie usagée à Bhojpur Dharampur, qui est devenu un bassin d'emploi régional, procurant un travail à de nombreuses personnes affectées au transport, à la revente, à la découpe, à la fonte. L'activité emploie des ouvriers locaux, des musulmans de la ville voisine comme des hindous des villages aux alentours, notamment de Baru Bhoora, dont certains travaillent dans les fourneaux qu'ils appellent même « mandir batthi » (littéralement le « temple fourneau »). Les journaliers non qualifiés postés à la découpe des batteries gagnent en moyenne 400 roupies par tonne de plaques de plomb récupérée (soit 5 euros/tonne). Ceux chargés de la fonte de nuit sont payés 1,6 *paise* par kilogramme (soit 20 euros/tonne). Une recette à partager entre ouvriers : de cinq à dix en journée et trois ou quatre la nuit, dont le *maestri*. Ces salaires, *a priori* bas, nourrissent en réalité dans cette région rurale toute une famille. Opérant sans aucune protection, patrons, contremaitres, ouvriers oscillent selon les positions entre une forme de relativisme, voire de déni de la dangerosité (« Cela fait 20 ans que je fais ce travail, regardez-moi ! Je suis en pleine santé... » nous affirmait un contremaitre), et nécessité de conserver ce travail qui les fait vivre. « C'est peut-être risqué, mais c'est mon "rozi roti" (mon pain quotidien) », nous disait encore dans la nuit un ouvrier en novembre 2021 alors qu'il coulait des lingots de métal en fusion chaussé de simples claquettes.

Les villageois sont à la recherche d'alliés de circonstance, comme les chercheurs de passage et les obligent à prendre position. Étant donné l'absence complète de données environnementales ou

médicales sur le sujet, notre cartographie de l'impact de l'activité de recyclage constitue pour eux un enjeu afin de justifier leurs actions en justice pour demander la fermeture des usines.

Que faire alors ? L'utilisation des données produites pose des enjeux éthiques qui mettent en question la responsabilité et la légitimité des chercheurs sur un terrain sensible ; et il n'est pas certain que ces enjeux trouvent une « bonne » réponse... Dans un contexte de tensions communautaires entre hindous et musulmans exacerbées dans la région, il existe un risque d'instrumentalisation politique d'études telles que la nôtre. Alors que les propriétaires des usines sont tous issus de cette minorité, dans le village *dalit* de Baru Bhoora, la carrière politique d'un militant engagé dans la fermeture des usines se construit sur un violent ressentiment antimusulman. Les succès politiques du *Bharatiya Janata Party* (parti de la droite nationaliste hindoue, actuellement au pouvoir) ont contribué à attiser ces antagonismes avec le renforcement de l'idéologie « Hindutva » (hindouïté) selon une optique conflictuelle vis-à-vis des idéologies non-hindoues, en particulier l'islam, depuis l'arrivée au pouvoir du moine hindou Yogi Adityanath en Uttar Pradesh. Les récents pogroms (à Delhi en 2020) encouragent donc à la prudence dans la médiatisation de données afin d'éviter d'envenimer une situation déjà tendue pour les populations musulmanes. De la même manière, se pose aussi le risque accru pour les propriétaires des usines qui, en acceptant de nous ouvrir leurs portes, seront tenus par leurs pairs pour responsables des potentielles fermetures consécutives à notre étude.

Comment dans ce contexte prendre en compte les conséquences sanitaires et environnementales de l'activité de recyclage du plomb¹⁷ ? A quelles conditions villages et champs cultivés peuvent-ils cohabiter avec les ateliers ? Comment protéger les travailleurs et leur famille¹⁸ ? La mise aux normes des usines plutôt que leur fermeture est-elle une option quand sait que les mesures de confinement, d'aspiration et de retraitement de l'air représentent l'essentiel de la dépense énergétique d'un site ? Le cluster se maintiendrait-il ou se délocaliserait-il encore, à quelques dizaines de kilomètres de là à la faveur de réglementations « concurrentes » entre régions¹⁹ ? Sous quelles conditions les mesures géochimiques initiées et encore en cours d'analyse peuvent-elles apporter des éléments tangibles pour initier le dialogue auprès de l'ensemble des parties prenantes ?

Pour ne pas conclure

Qu'elles soient artisanales ou industrielles, les filières de production se structurent généralement en fonction d'une balance bénéfique/coût, comparant la valeur qui peut être tirée du produit à l'effort nécessaire pour l'obtenir. Que ce soit à Bhojpur ou ailleurs, les filières issues de la mine urbaine n'échappent pas à cette règle. D'une matière première très complexe par nature, seule une petite partie est aujourd'hui recyclée : cette partie vient essentiellement de « ce qui fond, se dissout ou se sépare facilement », le reste étant perdu, le plus souvent disséminé dangereusement dans nos milieux de vie.

Caractériser la diversité des processus techniques pour comprendre les formes de la circulation et de la transformation des matières récupérées, les faire évoluer, nécessite à un moment ou à un autre de connaître « ce qui fond, se dissout ou se sépare facilement ». Dans un premier temps, la boîte à outils

¹⁷ Alors qu'en France le plomb est le premier élément chimique inscrit au tableau des maladies professionnelles, en 1919, des mesures de contrôle sanitaire et environnemental ont été mises en place en 1999, suite à l'affaire de l'usine Métal Blanc, une entreprise située à Bourg-Fidèle (800 habitants) dans les Ardennes : https://www.lemonde.fr/societe/article/2005/02/22/dans-les-ardennes-l-usine-metal-blanc-est-jugee-pour-avoir-pollue-et-mis-des-vies-en-danger_399069_3224.html. Voir aussi le cas éloquent de Metaleurop (Rainhorn & Dumontier, 2013.)

¹⁸ A Bazoches, de nombreux cas de plombémies élevées ont été recensés parmi les enfants des employés de la STCM. Le plomb était transporté à l'intérieur des maisons par les vêtements de travail qu'on devait laver chez soi. Depuis, la STCM fournit et impose un équipement comportant les vêtements, le masque et le casque ; un système de lavage a été mis en place sur le site de production avec retraitement de l'eau utilisée.

¹⁹ Ce qu'il s'est produit avec la première réglementation en 2007, où une partie des usines sont parties s'installer dans l'Etat voisin de l'Uttarakhand, distant d'une trentaine de kilomètres seulement.

technographique mobilise les instruments du génie chimique pour enrichir ses descripteurs, menant à une compréhension plus fine des procédés artisanaux de recyclage de batteries au plomb en Inde. Ce recours a permis, dans les ateliers et à l'intérieur des fours, une quantification plus précise des rendements, de la pureté du plomb, de la quantité des réactifs nécessaire que les seules estimations de bilans de matières. Puis la focale s'élargit, l'enquête voulant se donner les moyens de documenter un angle mort des chaînes globalisées de recyclage : les effets locaux sur les milieux de vie des extractions dites secondaire de métaux. Partant de l'exploration ethnographique d'un maillon indien des filières de recyclage de batteries hors d'usage, nos enquêtes pour analyser des processus sociotechniques emboîtés et territorialisés, reconstituent de proche en proche des chaînes logistiques ; des chaînes opératoires, et finalement des chaînes de contaminations. De la filière au procédé, de l'atelier au champ, par une série d'aller-retour, une méthode itérative et reliée à un terrain, associe dans une même tentative, géographie du recyclage, analyse anthropologique de filières techniques, analyse physico-chimique des procédés métallurgiques et des contaminations.

Chemin faisant se dessine une bifurcation. Comment concrètement faire science autrement ? Pour non seulement enquêter « sur » des mondes sociaux du recyclage qui se structurent à différentes échelles, mais faire monde « avec » des communautés affectées, les habitants, les collectivités locales, les industries d'un territoire contaminé ? Comment faire de l'enquête un partage de connaissances situées à propos du terrain décrit ? Comment métaboliser des descriptions scientifiques et profanes en préoccupations communes quant à l'habitabilité d'un territoire ? Et ouvrir « des mondes possibles dans les ruines du capitalisme », pour reprendre la formule d'Anna L. Tsing (2017) ?

Bibliographie

Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2022, « Lead (Pb) Toxicity: Cover Page | Environmental Medicine », Adresse : <https://www.atsdr.cdc.gov/csem/leadtoxicity/cover-page.html>

Alier Joan Martinez, 2014, *L'écologie des pauvres. Une étude des conflits environnementaux dans le monde*, Les Petits Matins. Paris.

Appadurai A, 1988, *The Social Life of Things: Commodities in Cultural Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.

Barles Sabine, Bahers Jean-Baptiste, « Transition ou consolidation du régime dominant : le métabolisme urbain en question », *Flux*, 2019/2-3, n°116-117, p. 1-5. DOI: 10.3917/flux1.116.0001. URL : <https://www.cairn.info/revue-flux-2019-2-page-1.htm>

Buob Baptiste, Chevallier Denis et Gosselain Olivier, 2019, « Technographies », *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*, vol. , n° 71, p. 10-25.

Cavé, Jérémie. La gestion disputée d'un mal public impur : économie politique des ordures. Diss. Paris Est, 2013.

Cholez Céline et Trompette Pascale, 2020, « A mundane infrastructure of energy poverty: The informal trading of second-hand car batteries in Madagascar », *Journal of Material Culture*, vol. 25, n° 3, p. 259-288.

Clémentin-Ojha Catherine, 2009, « Article "caste" », *Dictionnaire de l'Inde*, p. 150-156.

Cook Ian, 2004, « Follow the Thing: Papaya », *Antipode*, vol. 36, n° 4, p. 642-664.

D'Arienzo, Roberto, 2017, *Métabolismes urbains. De l'hygiénisme à la ville durable, Naples, 1884-2004*, Geneva, MētisPresses, , 336 pp.

- Rainhorn, J., & Dumontier, C. 2013. Faire l'histoire d'un conflit manqué. Pollution environnementale et risques sanitaires autour de Metaleurop-Nord, (1970-2003). In Letté, M., & Le Roux, T. (Eds.), *Débordements industriels : Environnement, territoire et conflit (XVIIIe-XXIe siècle)*. Presses universitaires de Rennes. doi :10.4000/books.pur.111386
- Elhacham Emily, Ben-Uri Liad, Grozovski Jonathan, Bar-On Yinon M., et al., 2020, « Global human-made mass exceeds all living biomass », *Nature*, vol. 588, n° 7838, p. 442-444.
- EPA, 2020, *Lead in Soil*, U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Adresse : <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/lead-in-soil-aug2020.pdf> [Consulté le : 11 juillet 2022].
- Ericson Bret et al., 2021, « Blood lead levels in low-income and middle-income countries: a systematic review », *The Lancet Planetary Health*, vol. 5, n° 3, p. e145-e153.
- Ericson Bret, Landrigan Phillip, Taylor Mark Patrick, Frostad Joseph, et al., 2017, « The Global Burden of Lead Toxicity Attributable to Informal Used Lead-Acid Battery Sites ». *Annals of Global Health*, vol. 82, n° 5, p. 686.
- Letté, Michel, et Thomas Le Roux, ed. 2013. *Débordements industriels : Environnement, territoire et conflit (XVIIIe-XXIe siècle)*. Rennes : Presses universitaires de Rennes, 2013. Web. <<http://books.openedition.org/pur/111245>>.
- Fournier Pierre et Pascal Cesaro, 2020 « Les ressources de la fiction pour l'entretien », *Sociologie*, N° 4, vol. 11. URL: <http://journals.openedition.org/sociologie/7391>
- Fuller Richard et al., 2022, « Pollution and health: a progress update », *The Lancet Planetary Health*, v. [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(22\)00090-0/fulltext#:~:text=References-,Summary,for%20disease%20and%20premature%20death.](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(22)00090-0/fulltext#:~:text=References-,Summary,for%20disease%20and%20premature%20death.)
- Goreau-Ponceaud Anthony et Ponceaud-Goreau Emilie, 2020, « « Le pari de l'Inde » », *Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux*, vol. 73, n° 281, p. 17-39.
- Gosselain, Olivier, 2019, « FP 04. Protocole de collecte », *Techniques & Culture* URL : <http://journals.openedition.org/tc/11433> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/tc.11433>
- Graedel, Thomas E., 2011, "The prospects for urban mining." *Bridge* 41.1, pp. 43-50.
- Herrenschmidt Olivier, 1997, « Les Intouchables et la République indienne », *L'Inde contemporaine*, Paris.
- Jacobs, Jane., 1961 *The Death and Life of Great American Cities* , pp. 13-25.
- Lamy Jérôme, 2019, « Alexis Zimmer, Brouillards toxiques. Vallée de la Meuse, 1930, contre-enquête », *Cahiers d'histoire. Revue d'histoire critique*, 141
- Landrigan Philip J. et al., 2018, « The Lancet Commission on pollution and health », *The Lancet*, vol. 391, n° 10119, p. 462-512.
- Larrère Catherine, 2009, « La justice environnementale », *Multitudes*, vol. 36, n° 1, p. 156-162.
- Lestel Laurence 2003, Le cycle du plomb. 14èmes Journées Scientifiques de l'Environnement : l'Eau, la Ville, la Vie, Créteil, France. hal-00199344

- Manhart Andreas, 2016, « The deadly business – findings from the lead recycling Africa project », *Oeko-Institut*. Adresse : <https://www.oeko.de/oekodoc/2549/2016-076-de.pdf> [Consulté le : 6 décembre 2019].
- Schleicher Tobias et Manhart Andreas, 2015, « The recycling chain for used lead- acid batteries in Ghana », *Oeko-Institut*, p. 17.
- Sennett Richard, 2010, *Ce que sait la main. La culture de l'artisanat*, Albin Michel. Paris.
- Sigaut François, 2010, « Des Idées pour observer », *Techniques & Culture*, n°54-55. URL: <http://tc.revues.org/4991> ; DOI : 10.4000/tc.4991
- Theureau Jacques, 2010, « Les entretiens d'autoconfrontation et de remise en situation par les traces matérielles et le programme de recherche 'cours d'action' », *Revue d'anthropologie des connaissances*, vol 4, n°2, pp. 287-322
- Tsing Lowenhaupt Anna, *Le Champignon de la fin du monde : sur la possibilité de vivre dans les ruines du capitalisme*, trad. de l'anglais par Philippe Pignarre, préf. par Isabelle Stengers, Paris, La Découverte/Les Empêcheurs de penser en rond, 2017, 415 p.
- Wallsten, Björn, 2015, *The URK world: hibernating infrastructures and the quest for urban mining*. Diss. Linköping University Electronic Press, 2015.
- Xie Jing et Lu Yi-Chun, 2020, « A retrospective on lithium-ion batteries », *Nature Communications*, vol. 11, n° 1, p. 2499.
- Zhang Wei et al., 2016, « A critical review on secondary lead recycling technology and its prospect », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, p. 108-122.
- Zimmer Alexis, 2017, *Brouillards toxiques. Vallée de la Meuse, 1930, contre-enquête*. Edition Zones Sensibles. Paris