

Circularité maximale de l'électronique : cas d'étude au Pérou, rue Jr Leticia

Culture Sciences
de l'Ingénieur

La Revue
3E.I

Briac BAUDAIS¹

Édité le
19/01/2026

école
normale
supérieure
paris-saclay

¹ Docteur et futur post-doc au laboratoire IETR

Cette ressource fait partie du N° 118 de La Revue 3EI du premier trimestre 2026.

L'électronique est aujourd'hui au cœur de nos sociétés et des solutions proposées pour répondre, entre autres, au problème du changement climatique [1]. Cependant, elle est également à l'origine de divers problèmes qui, si l'on ne s'y penche pas, dégradent plus qu'ils n'aident. Parmi ceux-ci figurent le besoin en matériaux, toujours plus rares et plus purs, ainsi que des processus de fabrication, toujours plus complexes et énergivores [2,3].

Un des défis majeurs dans le secteur de l'électronique concerne les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE). Le rapport "The Global E-Waste Monitor" fournit une analyse approfondie de la quantité de déchets électroniques générée chaque année à l'échelle mondiale, ainsi que des tendances, des impacts et des défis associés [3]. La production de DEEE continue d'augmenter ; en 2022, elle a été estimée à 62 millions de tonnes (voir Figure 1). En l'espace de 12 ans, cette quantité a presque doublé, en raison des avancées technologiques, d'une consommation accrue, d'options de réparation limitées, de cycles de vie courts et d'une infrastructure de gestion des déchets souvent insuffisante.

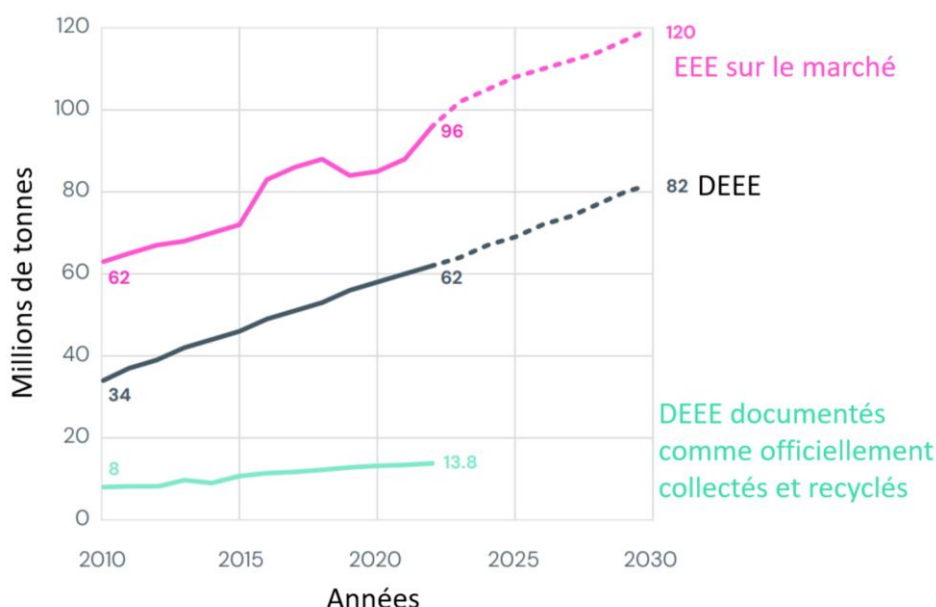


Figure 1 : Part des DEEE, des EEE et du recyclage en fonction du temps avec projection jusqu'en 2030 [3]

Cela soulève la question du recyclage : malheureusement, tous les déchets ne suivent pas une voie de recyclage formel (22 %), et le recyclage ne récupère qu'une faible part des matériaux en raison de leur faible proportion et de leur complexité d'alliage.

Face à ce constat, il est légitime de se poser la question suivante :

Pourquoi ne pas réparer les systèmes et les remettre dans le circuit économique ?

La réparation commence à se développer en France sur certains produits (téléphones, ordinateurs, etc.), mais elle reste encore timide, car elle est confrontée à des blocages normatifs, infrastructurels et culturels. D'autres pays pratiquent la réparation depuis toujours et à plus grande échelle, généralement dans des pays à plus faibles revenus, où la population se dirige plus vers la réparation et la seconde main, comme dans ce travail au Pérou. C'est pourquoi cet article présente le cas d'étude de la rue Jr Leticia au Pérou, qui s'est spécialisée dans la réparation de systèmes électroniques.

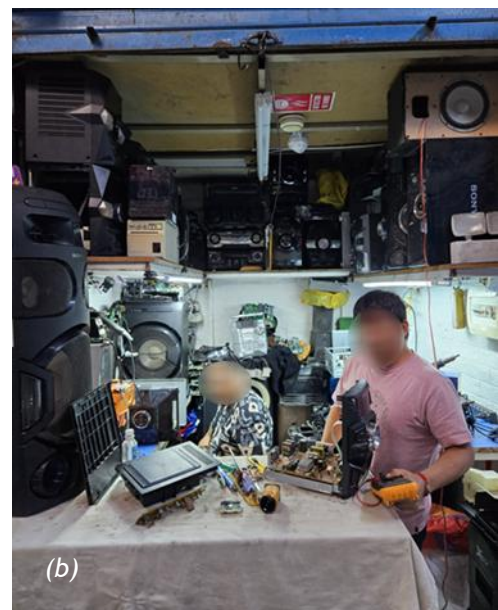
L'article a été conçu à partir d'articles sur le sujet des DEEE, sur la réparation des DEEE au Pérou mais aussi de deux investigations sur le terrain (15 Mai et 14 Juillet 2025), qui ont permis l'interview de différents acteurs de cette rue, vendeurs, réparateurs, école.

La première partie présente le fonctionnement de la rue Jr Leticia et les raisons de son succès. La deuxième partie aborde les aspects plus techniques de la réparation. La dernière partie est une discussion générale sur le modèle, ainsi que sur ses points positifs et négatifs.

1 - Rue Jr Leticia, fonctionnement

La rue Jr Leticia est située au cœur de Lima, la capitale du Pérou. Lima héberge une grande partie de la population du Pérou ($\approx 30\%$), elle est le cœur commercial, financier, culturel, politique, et concentre deux tiers de l'industrie. Comme beaucoup d'autres villes, à Lima les commerces d'une même thématique se regroupent dans un même quartier ou une même rue, Jr Leticia est donc une des rues de réparation de DEEE.

La rue Jr Leticia à Lima est née d'un besoin économique de réparer au lieu d'acheter neuf. Elle est un obstacle à l'économie du déchet. C'est une petite rue de 500 mètres de long, spécialisée dans la réparation et la maintenance de systèmes électroniques. Il faut imaginer un enchaînement de petites boutiques des deux côtés de la route, ainsi que des vendeurs de composants sur le trottoir (voir Figure 2). Généralement, les boutiques sont spécialisées, avec de nombreux réparateurs de télévisions, de téléphones et d'informatique [4].



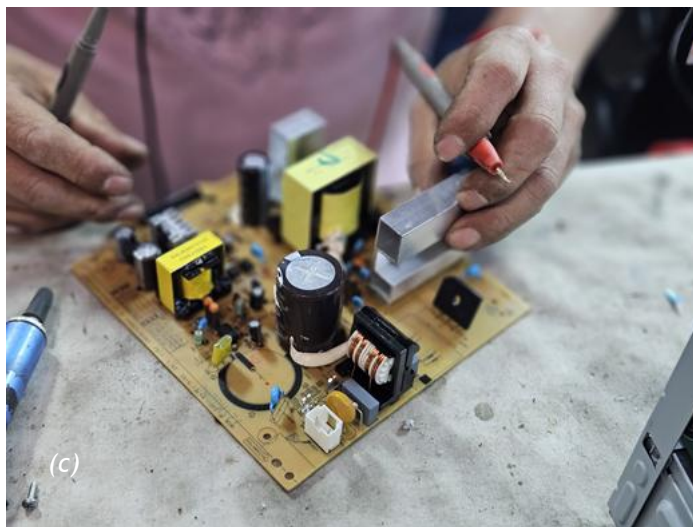


Figure 2 : Images rue Jr Leticia 14/07/2025. (a) vendeurs de rue, aimants, matériaux magnétiques, petit moteur électrique, etc. ; (b) boutique de réparation d'amplificateurs ; (c) test multimètre pour réparation d'un amplificateur ; (d) bout de chaîne, séparation des différentes parties des systèmes non réparables.

Le fonctionnement de la rue Leticia permet de rendre la réparation et la maintenance efficaces. La Figure 3 présente comment Leticia s'inscrit dans l'économie circulaire de l'électronique.

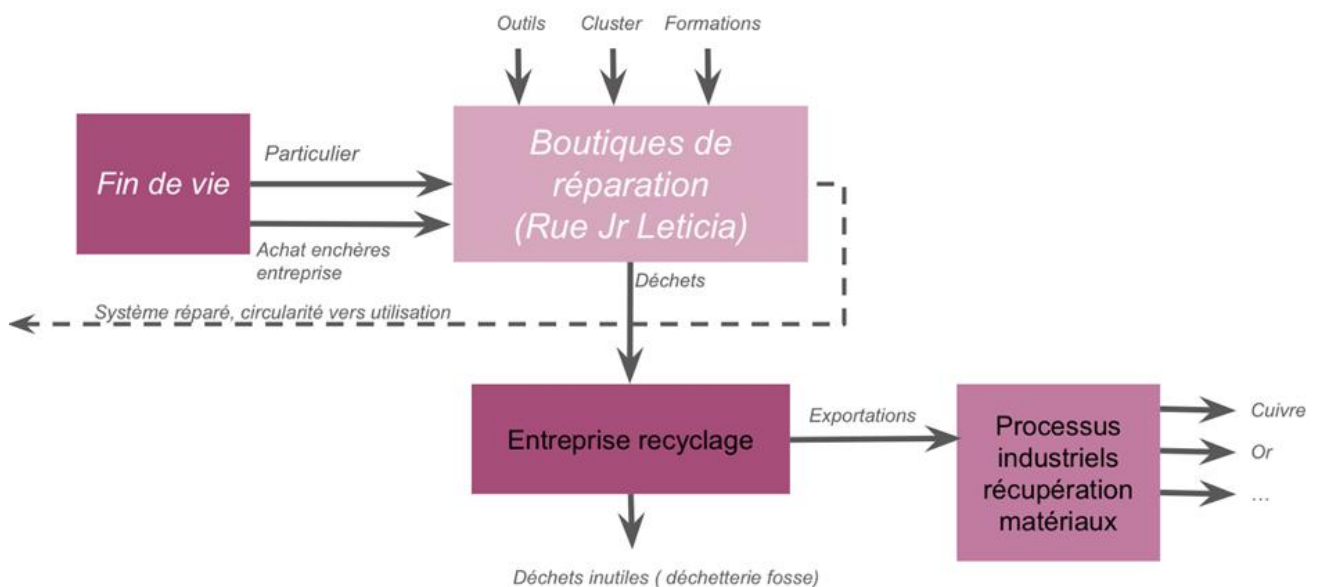


Figure 3 : Fonctionnement de Jr Leticia

Les flux d'entrées, c'est-à-dire les déchets, proviennent de deux sources. La première, la plus petite, est constituée par les particuliers qui viennent dans les boutiques avec des déchets à vendre ou à réparer. Le nombre de boutiques permet de choisir celle qui peut répondre à la demande.

La seconde source, plus importante, provient de l'achat de lots d'électronique destinés à la fin de vie. Ces lots sont vendus par différentes entreprises et proviennent généralement de l'étranger [5]. La Figure 4 présente la partie d'un lot acheté aux enchères, principalement composé ici d'imprimantes.



Figure 4 : Images rue Jr Leticia 14/07/2025. Lot acheté aux enchères

Ensuite, les déchets sont réparés. Certains fonctionnent encore, car les personnes ou entreprises remplacent leurs appareils avant la fin de vie, lorsque de nouveaux systèmes arrivent sur le marché [4].

Deux types de lots sortent de cette réparation :

1. Systèmes réparés : Les systèmes sont revendus pour être réutilisés (c'est la boucle la plus vertueuse de l'économie circulaire [6]).
2. Systèmes non réparés : Tous les systèmes ne sont pas réparés. Les réparateurs sont confrontés à des besoins économiques et ne peuvent pas passer trop de temps sur chaque réparation. Dans ce cas, le système est partiellement démantelé pour séparer l'électronique du reste (plastique, etc.) :
 - Le plastique est traité par la municipalité.
 - L'électronique est achetée par des entreprises spécialisées dans le recyclage, comme SAN ANTONIO RECYCLING (SAR). L'entreprise se charge de terminer le démantèlement des systèmes, de trier les différentes parties similaires (cartes électroniques, câbles, etc.), de les conditionner (compactés dans des sacs ou des boîtes) et de les valoriser, en les commercialisant localement ou en les envoyant à l'étranger. D'autres entreprises étrangères possèdent des machines et des processus permettant de récupérer certains matériaux à partir des déchets, par exemple l'or sur les cartes électroniques.

Un point important qui fait de la rue Leticia un acteur majeur de la réparation électronique à Lima est sa forte concentration de réparateurs, formant un cluster. La Figure 5 montre le cluster de boutiques de réparation, qu'elles soient formelles ou informelles, à Lima.



Figure 5 : Cluster de boutiques de réparation [7]

Cela permet de concentrer au même endroit les savoir-faire et les produits. Les personnes qui viennent acheter auront du choix, et celles qui réparent disposent de tous les composants, outils et connaissances nécessaires dans la rue. Ce regroupement a également permis d'attirer des instituts de formation spécialisés dans la réparation électronique (voir Figure 6).



Figure 6 : : Images rue Jr Leticia 14/07/2025. Formation à la réparation électronique dans la rue

Par exemple, pour commencer à réparer des cartes mères CPU, il suffit de suivre deux cours de 20 heures, coûtant chacun 260 soles (environ 60 €). Il n'est donc pas nécessaire de passer par une grande école. Le principe de la formation est d'aller le plus rapidement possible à la pratique. Le premier cours porte sur les bases de l'électronique (composants de base, semi-conducteurs, utilisation d'un multimètre, soudure, lecture de circuits, identification de pannes), tandis que le deuxième est une spécialisation sur les CPU (architecture, régulateur de tension, programmation de mémoire flash EPROM, détection de conflits, problèmes de connexion).

Les étudiants, peu importe leur âge, viennent suivre des cours à la carte en fonction de leur spécialisation souhaitée. Certains viennent ensuite s'essayer dans les boutiques en achetant du

matériel non fonctionnel pour le réparer. Certaines écoles de mécatronique envoient également leurs étudiants se fournir dans la rue pour leurs différents projets.

2 - Réparation

Les boutiques de réparation sont côte à côte, petites, occupant quelques mètres carrés. Les réparateurs peuvent être seuls ou plusieurs par boutique, travaillant dans un amas de DEEE, comprenant des déchets pour les pièces, des déchets de lots achetés en gros à réparer pour la revente, ainsi que des objets des clients à réparer (voir Figure 7).



Figure 7 : Images rue Jr Leticia 14/07/2025. Photos des boutiques et du stockage

Les boutiques sont généralement spécialisées ; beaucoup se consacrent à la réparation de télévisions, d'autres d'amplificateurs, d'autres encore d'UPS (Uninterruptible Power Supply), d'autres de mixeurs, etc.

Pour réparer les systèmes, il n'y a généralement pas beaucoup d'outils. Les réparateurs utilisent des outils de mécanique tels que des tournevis, scies, marteaux, etc., ainsi que des outils spécifiques à l'électronique, comme un multimètre, un fer à souder, parfois un souffleur d'air chaud, une pompe à dessouder, des pinces à dénuder et de l'étain. Il n'y a pas d'oscilloscope, et très rarement une alimentation de laboratoire. Un stock de composants ou de parties de systèmes est présent et renouvelé. Par exemple, les réparateurs de télévisions stockent les téléviseurs achetés en gros qu'ils n'ont pas pu réparer pour la revente, afin d'utiliser les pièces fonctionnelles. Les boutiques peuvent également s'acheter entre elles les parties nécessaires.

Généralement, les différentes étapes d'une réparation sont les suivantes [4] :

1. Diagnostic

Premièrement, le système est ouvert. Les réparateurs doivent souvent faire preuve d'ingéniosité, car beaucoup de systèmes ne sont pas conçus pour être réparés, ce qui peut endommager davantage le système lors de l'ouverture. Il faut identifier le problème, ce qui peut être rapide, en un coup d'œil, si un composant ou une carte a subi un court-circuit. Sinon, des tests avec un multimètre sont effectués pour tester les composants et la conductivité.

Pour diagnostiquer, les réparateurs peuvent utiliser des diagrammes de cartes disponibles, généralement non fournis par le fabricant. Cependant, des communautés partagent ces diagrammes

sur Internet, comme Vinafix, qui propose des diagrammes de cartes mères d'ordinateurs pour la réparation. Cela reste rare, donc les réparateurs peuvent également chercher des tutoriels sur YouTube, pas toujours bien filmés et avec un son approximatif, mais cela constitue l'une des rares sources disponibles aujourd'hui. Le diagnostic est d'abord effectué sur le système éteint, puis possiblement sous tension si la panne n'est pas trouvée.

2. Sécurité

Le système est mis hors tension.

3. Réparation ou mise au rebut

La partie défectueuse est réparée à l'aide des outils, par remplacement du composant, de la carte ou autre, grâce au stock disponible. Plus les systèmes sont récents, plus l'électronique est petite (type CMS), et les réparations se font alors par le changement de parties entières, comme des cartes électroniques (même si le remplacement de composants individuels reste possible). Plus le système est ancien, plus les composants sont traversants, ce qui facilite le remplacement individuel du composant défectueux. Le système est refermé, parfois avec ingéniosité si un élément a été cassé lors de l'ouverture. Si le système ne peut pas être réparé, les parties fonctionnelles intéressantes sont conservées, le plastique est géré par la municipalité, et l'électronique est vendue à l'entreprise de recyclage.

4. Test final

Le système est rebranché et ses fonctionnalités sont testées.

La réparation est directement liée à l'expérience du réparateur. Par exemple, pour le diagnostic, en fonction du système à réparer, le réparateur connaît les points de faiblesse à examiner en premier. Pour les vieilles télévisions, il s'agit généralement d'un condensateur, tandis que pour les modèles récents, ce sont souvent les bandes de LED. Pour les UPS, ce sont le plus souvent les batteries, etc.

Généralement, la réparation ne permet pas encore de mettre à jour les systèmes, en raison de l'hétérogénéité du matériel et des logiciels. L'ordinateur fixe constitue un contre-exemple, car il permet d'ajouter, par exemple, de la mémoire ou de changer une carte graphique.

3 - Discussion et conclusion

La rue Jr Leticia constitue un exemple concret de circularité pour les systèmes électriques et électroniques. Elle permet, dans de nombreux cas, de proposer une réparation, prolongeant la vie des produits tout en n'injectant que peu d'énergie et de matériaux, contrairement à la production de nouveaux appareils. L'article [7] tente de quantifier les gains environnementaux en termes de CO2 et d'eau liés aux boutiques de réparation. Il met en évidence le gain que représente la réparation, tout en soulignant la difficulté de quantifier ces bénéfices. Cela s'explique par le fait que ce secteur reste informel, rendant la quantification des flux difficile à obtenir. L'article [7] présente la quantification comme une opportunité ; malgré sa complexité, une quantification précise des impacts environnementaux démontrerait les différents gains et pourrait servir de levier pour les politiques, en s'inspirant de ce type de rue et en formalisant les pratiques.

Actuellement, les avantages de ce type de rue sont facilités par sa structure informelle. Contrairement au secteur formel, elle est affranchie de certaines normes qui peuvent ralentir ou entraver le processus, bien qu'elles garantissent la qualité des services proposés. Les boutiques de

réparation s'efforcent d'assurer la qualité de leur travail ; certaines proposent même des assurances post-réparation, mais cela reste très anecdotique.

Il existe donc un véritable enjeu à s'inspirer de ce type de rue ou à collaborer avec elle. C'est ce que semble faire de plus en plus le secteur formel. Dans l'article [8], la journaliste souligne que Leticia n'est pas une solution sans externalités négatives et qu'il subsiste des défauts qui pourraient être corrigés en liant les secteurs formel et informel. Elle présente les Cachineros, des personnes chargées de récupérer ce qui ne se vendra pas. Ces derniers démantèlent ensuite les déchets dans la rue, sans se soucier de la pollution, en jetant ce qui ne servira plus, dans le but de récupérer différents matériaux isolés à revendre (cuivre, divers métaux, etc.). Aujourd'hui, dix ans plus tard, cette pratique a pris fin ; les Cachineros ont été remplacés par des entreprises de recyclage, comme SAR, présentées précédemment. Un lien commence donc à se créer entre les secteurs formel et informel pour rendre le système aussi vertueux que possible.

L'article fait également référence à une descente de police visant à confisquer le matériel, mais cela semble désormais révolu. Les réparations semblent acceptées par le gouvernement, sans parler d'aide, il n'y a plus d'intervention pouvant freiner ces activités.

Enfin, il est important de préciser que les réparateurs ne travaillent pas dans le but de réduire les impacts environnementaux, mais principalement pour des raisons économiques. La réparation reste avant tout un métier comme un autre, permettant de gagner plus que le salaire minimum péruvien.

Références :

[1]: Valérie Masson-Delmotte et al., éd. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. doi : 10.1017/9781009157896.

[2]: Roland Hischier et al. "Life Cycle Inventories of Electric and Electronic Equipment: Production, Use and Disposal". en. In: 18 (2007).

[3]: The Global E-waste Monitor 2024. en-US. 2024. url : <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/> (visité le 25/03/2024).

[4]: Quispe Solano, F. (2025). Interview Freddy Quispe Solano, réparateur Jr Leticia depuis 40 ans. Mai 2025.

[5]: Kahhat, Ramzy & Williams, Eric. (2010). Adoption and disposition of new and used computers in Lima, Peru. Resources, Conservation and Recycling. 54. 501-505. 10.1016/j.resconrec.2009.10.006.

[6]: Salomez, F.; Helbling, H.; Almanza, M.; Soupremanien, U.; Viné, G.; Voldoire, A.; Allard, B.; Ben-Ahmed, H.; Chatroux, D.; Cizeron, A.; et al. State of the Art of Research towards Sustainable Power Electronics. Sustainability 2024, 16, 2221. <https://doi.org/10.3390/su16052221>

[7]: Lepawsky, Josh & Cáceres, Kathia & Gusukuma, Marco & Kahhat, Ramzy. (2023). Carbon and water conservation value of independent, place-based repair in Lima, Peru. Journal of Industrial Ecology. 27. 10.1111/jiec.13368.

[8]: Radulovic, V. (2017). Electronics reuse and recycling in Peru: A photographic exploration. 27 mars 2017. <https://discardstudies.com/2017/03/27/electronics-reuse-and-recycling-in-peru-a-photographic-exploration/>