

## **Titre : Transfert de puissance électromagnétique sans fil, impact écologique et économie circulaire : vers une analyse du cycle de vie paramétrique et prospective**

**Mots clés en français :** Transmission de puissance sans fil, radiofréquences, électronique, électronique de puissance, calcul d'impacts, ACV, économie circulaire

Les laboratoires CITI et Ampère rattachés à l'INSA Lyon proposent, en lien avec l'UAR 2049 Utopii du CNRS, un sujet de thèse sur l'impact écologique des technologies de transfert de puissance sans fil.

Les technologies de transfert de puissance radio sans fil (WPT, Wireless Power Transfer) émergent comme une solution prometteuse pour alimenter des dispositifs connectés, des véhicules électriques ou des infrastructures IoT, réduisant ainsi la dépendance aux câbles et aux batteries jetables. Cependant, leur déploiement massif soulève des enjeux environnementaux majeurs, liés à l'extraction des matériaux, à la consommation énergétique des infrastructures, aux émissions électromagnétiques, amplifiées par d'éventuels effets rebond. Dans un contexte de transition écologique et de sobriété numérique, l'évaluation rigoureuse de leur impact environnemental devient cruciale pour aller vers une écoconception de ces systèmes complexes. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV), méthode normalisée (ISO 14040/44), est l'outil de référence pour quantifier ces impacts, mais son application aux technologies WPT reste limitée à cause de certaines lacunes : manque de données spécifiques, variabilité des scénarios d'usage, et absence de modèles paramétriques, absolus (intégrant des seuils écologiques planétaires) et prospectifs (anticipant les évolutions technologiques et réglementaires). Ce travail s'inscrit à l'intersection de l'électronique durable, de l'écoconception et de la modélisation environnementale, en proposant une approche innovante pour évaluer finement les impacts des systèmes WPT. Il s'appuie sur des avancées récentes en ACV prospective, en intégration de critères de circularité (ISO 59004), et en scénarios prospectifs (comme ceux développés par l'IPCC ou l'ADEME), afin de fournir des leviers d'action pour une conception sobre et résiliente. Cette recherche contribue ainsi aux objectifs de développement durable (ODD 7, 9 et 12) et aux stratégies européennes de neutralité carbone, tout en répondant aux besoins sociétaux d'outils d'aide à la décision adaptés aux technologies émergentes.

### **Contacts**

**Directeur de thèse :** Guillaume Villemaud (PR 2C INSA Lyon, 6 avenue des Arts 69621 Villeurbanne cedex, HDR, [guillaume.villemaud@insa-lyon.fr](mailto:guillaume.villemaud@insa-lyon.fr)).

**Co-encadrant :** Vincent Léchappé (MCF CN INSA Lyon, 25 Av. Jean Capelle, 69100 Villeurbanne, [vincent.lechappe@insa-lyon.fr](mailto:vincent.lechappe@insa-lyon.fr)).

### **DETAILS**

#### **Verrous scientifiques**

L'objectif général est de développer une **approche basée sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) paramétrique et prospective** pour évaluer et minimiser l'impact écologique des technologies de transfert de puissance radio sans fil, en intégrant les enjeux de sobriété, de circularité et d'innovation technologique.

Plus spécifiquement, on peut identifier les principaux verrous :

- 1. Caractériser les impacts environnementaux des WPT :**
  - Identifier et quantifier les **hotspots** (points critiques) du cycle de vie des systèmes WPT (ex : extraction des matériaux, phase d'usage, fin de vie), en fonction de différents scénarios d'application (IoT, véhicules électriques).
  - Comparer les performances environnementales des WPT avec des solutions alternatives (ex : câbles, batteries).
- 2. Développer un modèle ACV paramétrique :**
  - Concevoir un **modèle flexible** permettant d'adapter les paramètres techniques (puissance, distance, fréquence) et contextuels (mix énergétique, durée de vie) pour évaluer finement les impacts.
  - Intégrer des **indicateurs absolus** (ex: ressources abiotiques) pour situer les résultats dans un cadre écologiquement sûr.
- 3. Explorer des scénarios prospectifs :**

- Modéliser l'évolution des impacts en fonction de **scénarios technologiques** (amélioration de l'efficacité, nouveaux matériaux), **structurels** (mix énergétique, infrastructures) et **réglementaires** (ex : restrictions sur les terres rares, politiques de recyclage).
  - Évaluer l'influence des **modèles d'économie circulaires** (réemploi, recyclage, économie de la fonctionnalité) sur la réduction des impacts.
4. **Proposer des leviers d'écoconception :**
    - Identifier des **pistes d'optimisation** (choix des matériaux, architecture des systèmes, gestion de l'énergie) pour réduire l'empreinte écologique des WPT.
    - Élaborer des **recommandations** pour les concepteurs, industriels et décideurs publics, en alignement avec les ODD et les stratégies de neutralité carbone.
  5. **Valider la méthodologie :**
    - Appliquer le modèle à des **cas d'étude concrets** (ex : recharge de véhicules électriques, capteurs IoT) pour tester sa robustesse et sa pertinence.
    - Confronter les résultats avec des experts (industriels, académiques) pour affiner hypothèses et indicateurs.
  6. **Contribuer à l'avancement des méthodes d'ACV :**
    - Publier des **bonnes pratiques** pour l'évaluation environnementale des technologies émergentes, en particulier dans le domaine de l'électronique sans fil et de l'électronique de puissance.
    - Participer à la standardisation des approches (ex : via des réseaux comme SCORE LCA ou des normes ISO 59000).

### Déroulement de la thèse

Dans un premier temps, une analyse de la littérature technique autour des différentes techniques de transmission de puissance sans-fil permettra d'avoir une vue globale des avantages et inconvénients des différentes architectures. Dans la suite une revue des premiers travaux proposant des études ACV de système WPT sera menée [4] [5] [6] [7]. En se basant sur ces premiers travaux, les paramètres importants permettant de mettre en place une ACV paramétriques seront identifiés. Le choix de ces paramètres permettra aussi d'optimiser à l'aide de l'outil *LCA algebraic* [8] la conception des dispositifs WPT en limitant leurs impacts sur l'environnement (approche d'écoconception). En parallèle, une veille bibliographique sur les avancées en ACV prospective [9] et absolue [10] sera effectuée. Des scénarios d'adoption technologiques sur la recharge de véhicules électriques ou des capteurs IoT par exemple, seront proposés et évalués à l'aide de l'outil *Premise* [11]. Finalement, la formulation de critères ACV absolus (prenant en compte les limites planétaires) adaptés à la technologie WPT seront introduits dans les analyses prospectives précédentes. Enfin, les résultats seront analysés et confrontés auprès des différents acteurs industriels et académiques du domaine afin de confirmer la pertinence de la méthodologie (applicabilité et fiabilité).

### Caractère innovant

Cette thèse propose une approche inédite en combinant ACV paramétrique et prospective pour évaluer les technologies de transfert de puissance sans fil (WPT). Contrairement aux études existantes, souvent statiques, elle développe un modèle flexible intégrant des paramètres techniques (puissance, fréquence) et contextuels (mix énergétique, durée de vie, usage), permettant une évaluation dynamique des impacts environnementaux. L'utilisation d'indicateurs absolus (limites planétaires) permet de situer les résultats dans un cadre écologiquement sûr, une avancée méthodologique rare en ACV. L'intégration d'outils comme *LCA algebraic* et *Premise* optimise la modélisation et l'analyse de scénarios futurs, en relation avec des problématiques industrielles.

L'innovation réside aussi dans l'intégration systématique de l'économie circulaire (réemploi, recyclage, écoconception) dans l'ACV des WPT, en alignement avec la norme ISO 59004. Peu d'études actuelles abordent cette dimension pour les technologies sans fil. La thèse pourra contribuer également à la standardisation via des réseaux comme SCORE LCA et la norme ISO 15118-8, en proposant des bonnes pratiques pour les technologies émergentes.

### Références bibliographiques

- [1] J. Argote-Aguilar, M. Wei, F. Hutu, G. Villemaud, M. Gautier, O. Berder, R. Negra. "Wide Power Range RF Energy Harvester for Powering Ultra-Low-Power Devices", in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 72, no. 10, Oct. 2024
- [2] R. Rousseau, G. Villemaud, F. Hutu. "State-Space Model Representation to Characterize an Energy Harvesting Circuit". Radio Science Letters, Allen Press, 2020.
- [3] F. Hutu, V. Léchappé, G. Villemaud, M. Loreto. Study of Distributed Beamforming for Wireless Power Transfer in Presence of RF Impairments. Radio Science Letters, Allen Press, 2020

- [4] M. Gonzalez et al., "Technical and Ecological Limits of 2.45-GHz Wireless Power Transfer for Battery-Less Sensors," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 17, pp. 15431-15442, 1 Sept.1, 2023,
- [5] Bi, Z., De Kleine, R. and Keoleian, G.A. (2017), Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Model for Comparing Plug-in versus Wireless Charging for an Electric Bus System. Journal of Industrial Ecology, 21: 344-355
- [6] J. C. Quinn, B. J. Limb, Z. Pantic, P. Barr, R. Zane and T. H. Bradley, "Feasibility of wireless power transfer for electrification of transportation: Techno-economics and life cycle assessment," 2015 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Ogden, UT, USA, 2015, pp. 245-249
- [7] Aloui, R., Lafarge, B., Debéda, H. et al. Ecodesign and life cycle assessment of piezoelectric energy harvesters. ISSS J Micro Smart Syst (2025) <https://doi.org/10.1007/s41683-025-00142-0>
- [8] Jolivet, R., Clavreul, J., Brière, R. et al. Ica\_algebraic: a library bringing symbolic calculus to LCA for comprehensive sensitivity analysis. Int J Life Cycle Assess 26, 2457–2471 (2021)
- [9] Anissa Nurdiawati, Basit A. Mir, Sami G. Al-Ghamdi, Recent advancements in prospective life cycle assessment: Current practices, trends, and implications for future research, Resources, Environment and Sustainability, Volume 20, 2025,
- [10] Manja Nørrekær Lund, Anna Kristina Schjerbeck, Anders Bjørn, Using absolute environmental sustainability assessment and mid-to-endpoint modeling to identify the most relevant impact categories to include in a building LCA, Building and Environment, Volume 278, 2025,
- [11] R. Sacchi, T. Terlouw, K. Siala, A. Dirnaichner, C. Bauer, B. Cox, C. Mutel, V. Daioglou, G. Luderer, PProspective EnvironMental Impact asSEment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 160, 2022.
- [12] G. Villemaud, M. Saadé, A. C. Orgerie, S. Verdeyme, "Evaluation environnementale d'un programme de recherche : proposition d'un cadre méthodologique", Congrès Management du Cycle de Vie, MCV2025, novembre 2025, Bordeaux, France.
- [13] A. Prévost, F. Demichel, V. Léchappé, H. Helbling, R. Delpoux, X. Brun. A framework for technico-environmental optimization of small wind turbines. Applied Energy, 2025.

---

### Comment postuler

Pour postuler, merci d'envoyer aux contacts votre CV, une lettre de motivation explicitant clairement votre motivation pour effectuer une thèse en lien avec votre cursus et votre projet professionnel, ainsi que vos bulletins ou relevés de notes de niveaux M1 et M2.

## Bouquet de thèses 2026

Le sujet de thèse de doctorat décrit ci-après s'inscrit au sein d'un bouquet de thèses dont le but est de construire une approche scientifique pluridisciplinaire pour aborder l'enjeu sociétal « Economie circulaire », identifiée comme un enjeu prioritaire par les 4 établissements du Collège d'Ingénierie Lyon Saint-Etienne (Centrale Lyon, ENTPE, INSA Lyon, Mines Saint-Étienne) et par l'Université Jean Monnet Saint-Étienne, qui soutiennent financièrement les thèses formant ce bouquet 2026.

Le bouquet de thèses 2026 regroupe 6 sujets qui abordent des questions scientifiques variées associées à cet enjeu sociétal « Economie circulaire » :

- SMART-PLAST – Systèmes de Mesures Avancées et Rétroaction par IA pour l'identification, le Tri et le désencrage des films PLASTiques pour optimiser leur recyclage
- Eco-conception de films épais à base de chitosane : de la formulation à la mise en forme pour les laboratoires sur puce (ECO-LOC)
- Scénarios de valorisation des déchets à horizon 2050 : proposition d'un modèle multi-agent de simulation prospective pour l'analyse environnementale de filières socio-techniques territoriales contrastées
- Orchestrer la boucle du réemploi du verre : optimisation multi-échelons des opérations logistiques
- L'empreinte environnementale associée à la mobilité et au logement des ménages – de son estimation à l'analyse des facteurs socioéconomiques et territoriaux explicatifs de son niveau
- Transfert de puissance électromagnétique sans fil, impact écologique et économie circulaire : vers une analyse du cycle de vie paramétrique et prospective

Ces thèses rassemblent au total 17 encadrants rattachés à 10 laboratoires du site Lyon Saint-Etienne (Ingénierie des Matériaux Polymères, Laboratoire Hubert Curien, Institut des Nanotechnologies de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Centre d'Innovation en Télécommunications et Intégration, Laboratoire Ampère, Laboratoire d'Information, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes, Laboratoire Environnement Ville Société, Laboratoire Decision and Information Systems for Production systems, Laboratoire Aménagement, Economie, Transports) dont les 5 établissements financeurs sont tutelles. Les 6 doctorants recrutés au titre de ce bouquet seront inscrits dans 5 Écoles Doctorales du site : Sciences Ingénierie Santé (ED 488), Matériaux (ED 34), Informatique Mathématiques (ED 512), Sciences Sociales (ED 483), Electronique, Electrotechnique et Automatique (ED 160).

Les équipes (doctorants et leurs encadrants) impliquées dans ces 6 thèses forment une communauté scientifique pluridisciplinaire : des échanges réguliers entre ces équipes se dérouleront tout au long des 3 années du parcours doctoral, notamment sous la forme de séminaires communs permettant de développer l'approche systémique pluridisciplinaire propre au bouquet et d'enrichir les compétences disciplinaires des équipes dans un esprit de partage et d'apprentissage. Les mémoires de thèses produits à l'issue du parcours doctoral reflèteront également le positionnement original des travaux de thèse au sein d'un bouquet en incluant un chapitre qui développera l'analyse de l'impact des travaux réalisés sur l'enjeu « Economie Circulaire ».