

# SYMPOSIUM



**PROPOSALS**

SYMPORIUM POUR  
L'ÉLECTRONIQUE & LE  
NUMÉRIQUE DURABLES

16 DECEMBRE 2025



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
ÉLECTRONIQUE

Pôle universitaire  
d'innovation  
Grenoble Alpes

UGA  
Université  
Grenoble Alpes



EN CONCERTATION AVEC





# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

## AVEC LE SOUTIEN DE



**La Région**  
Auvergne-Rhône-Alpes



**GIANT**  
INNOVATION CAMPUS



DIGITAL LEAGUE®  
Auvergne-Rhône-Alpes



ceo leti



PRIMA  
Les matériaux pour avancer



UGA  
Université Grenoble Alpes



AKTANTIS



Centre Français Fiabilité



La Région  
Auvergne-Rhône-Alpes  
ENTREPRISES



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

## Table des matières

1.	Prévenir l'âgisme pour une IA inclusive et responsable.....	5
2.	Évaluation de la fiabilité de systèmes électroniques réemployés .....	6
3.	Paper PCB for sustainable electronics.....	7
4.	ElecImpact : Vers une base de données ouverte et collaborative pour l'ACV en électronique.....	8
5.	Environmental impact of the design phase of the Internet of Medical Things .....	9
6.	Addressing Sustainability in Power Electronics R&D at CEA LETI.....	10
7.	Alternatives aux substances PFAS pour la fabrication des circuits électroniques en 3 dimensions.....	11
8.	La conception orientée « milieux » en électronique de puissance.....	12
9.	Un wiki collaboratif pour la traçabilité et la comparabilité des inventaires de cycle de vie.....	13
10.	Inspired by nature: on the road to maximum circularity for consumer electronics boards.....	14
11.	Comment développer des méthodes ouvertes pour l'ACV sociale en électronique ? .....	15
12.	Projet RESIN GREEN : Développement de résines bio-sourcées de lithographie pour des applications mic .....	16
13.	Etude des impacts environnementaux en microscopie appliquée à des échantillons biologiques .....	17
14.	Beyond Silicon Area: Co-Product Allocation for Binning-Aware Carbon Footprint of Processors .....	18
15.	Une approche structurée pour guider les développements technologiques vers la soutenabilité.....	19
16.	Des outils pédagogiques pour un Numérique plus responsable.....	20
17.	PCBnCO: A Carbon Intensity Model of FR-4 Printed Circuit Boards Based on Company Data .....	21
18.	Life-cycle assessment of a MEMS optomechanical technological process.....	22
19.	Développement d'epoxy biosourcée pour l'assemblage microélectronique .....	23
20.	Fabrication additive de circuits imprimés : Une voie vers une électronique plus durable.....	24
21.	Système de tri alliant vision machine et rayons-X pour le recyclage de métaux critiques .....	25
22.	From Biometric Wearables to Sustainable Pedagogy: Linking Sensors, AI, and Education.....	26
23.	Apprentissage de l'ACV électronique avec l'outil logiciel EIME .....	27
24.	Numérisation du suivi de wafer pour le Suivi D'Equipement et des plaques de qualifications .....	28
25.	Comment transformer sa société pour rentrer sur le chemin de la durabilité de façon pérenne .....	29
26.	Life cycle assessment of an electronic grade silicon wafer: a review and update of data .....	30
27.	Analyses de cycle de vie (ACV) de filières d'intégrations de lasers III/V sur silicium .....	31
28.	Unveiling sustainability-driven mindsets: an IAT-Based Tool to evaluate pro-environmental culture .....	32
29.	ANNULE .....	33
30.	Integrating Sustainability into Engineering Education .....	34
31.	ANNULE .....	35
32.	Optimiser le logiciel pour faire durer le matériel : l'approche EROOM.....	36
33.	Réemploi des produits électroniques composés de mémoires flash par irradiation non Destructive .....	37
34.	How could new eco-reliable design reduce the overall environmental footprint of PCBs ? .....	38
35.	Les technologies numériques peuvent-elles favoriser la décarbonation des entreprises ? Une étude empirique du secteur de la construction .....	39
36.	Nettoyage après gravure plasma de structures profondes de type TSV.....	40
37.	Défis méthodologiques d'une ACV de smartphones.....	41



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

38.	Comment initier et structurer une démarche dans le développement durable en étant un maillon dans le cycle de vie d'un produit .....	42
39.	Impact d'une taxe carbone sur le coût total du cycle de vie de serveurs .....	44
40.	Analyse de cycle de vie du procédé de lithographie par nanoimpression. ....	46
41.	SAV et durabilité : une approche Lean créatrice de valeur pour le client, l'entreprise et la planète .....	47
42.	E-Waste Disassembly System for Component Recovery and Reuse .....	48
43.	Exploring Sustainable Tech Imaginaries through Design Fiction: The Case of Device Companions.....	49
44.	Early signs of a sustainable semiconductor future .....	50
45.	Allier haute technologie et responsabilité environnementale : construction du site de production d'Aledia à Champagnier .....	51



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

MONFORT Emmanuel - Auteur présentateur - Université Grenoble Alpes

## 1. PREVENIR L'AGISME POUR UNE IA INCLUSIVE ET RESPONSABLE

La durabilité numérique doit prendre en compte non seulement l'environnement, mais aussi les dimensions sociales et éthiques, notamment en analysant l'impact de l'âgisme sur la conception de l'IA. Des études montrent que les préjugés liés à l'âge influencent la perception des IA et que des interventions structurelles sont nécessaires pour favoriser une conception inclusive.

Dans un contexte de transitions démographique, la durabilité du numérique ne se limite pas à sa dimension environnementale. Elle doit intégrer la durabilité sociale et éthique. Notre recherche s'inscrit dans cette perspective, en étudiant l'influence de l'âgisme sur la conception des outils d'intelligence artificielle (IA). Deux études menées auprès de professionnels de l'IA ont permis d'analyser les mécanismes par lesquels les stéréotypes âgistes orientent la conception technologique liée à l'IA. La première étude, combinant méthodes quantitatives et qualitatives ( $n = 27$ ), a mis en évidence que le niveau d'âgisme module la perception des bénéfices et des risques de l'IA: les professionnels les moins âgistes envisagent des usages qui favorisent l'autonomie et la sécurité, tandis que les plus âgistes privilégient une approche paternaliste centrée sur la protection. La seconde étude, quantitative ( $n = 30$ ), indique qu'une vidéo de sensibilisation améliore la reconnaissance des biais, mais se traduit peu en intention d'engagement, suggérant que ces biais nécessitent des interventions ciblées et structurelles. Ces travaux démontrent que la lutte contre l'âgisme constitue un levier essentiel d'innovation inclusive. Promouvoir le co-design, diversifier les équipes et renforcer la formation éthique des concepteurs apparaissent comme des conditions nécessaires pour que l'IA contribue à un numérique durable et socialement juste.

créer #AWorld4AllAges avec la  
CAMPAGNE MONDIALE CONTRE L'ÂGISEME



## IATRANSÉRATIONNELLES

CE FILM A ÉTÉ RÉALISÉ GRÂCE AU SOUTIEN DE LA CHAIRE SL2I

SCENARIO ET DIALOGUES :  
**EMMANUEL MONFORT** (TIMC, UMR 5525, CNRS, UGA),  
**STÉPHANE ALVAREZ** (PACTE, UMR 5194, CNRS, UGA),  
**ELÉA DANNET ET LUCIE-MARIE RAMCHURN**  
(GRADUATE SCHOOL BIEN VIVRE BIEN VIEILLIR @UGA)

RÉALISATION :  
**BENJAMIN LEBÈGUE**

**SL2I** Smart Life Smart Living  
**MIAI Cluster IA** Multidisciplinary Institute In Artificial Intelligence  
**TIMC**  
**Pacte** Laboratoire de sciences sociales  
**UGA** Université Grenoble Alpes  
**Cnrs**  
**FRANCE 2030**



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

BRUSSELMANS Nicolas - Auteur présentateur; RASKIN Jean-Pierre - Université Catholique de Louvain

FERON Jean-Pierre - Citronics

## 2. ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ DE SYSTEMES ELECTRONIQUES REEMPLOYES

Cette étude explore la fiabilité de dispositifs électroniques réaffectés, tels que des smartphones transformés en ordinateurs embarqués, à travers des tests de vie accélérés. Les résultats permettent d'établir des modèles de dégradation et d'identifier des indicateurs de haut niveau, ouvrant la voie à une évaluation normalisée de la durabilité des systèmes électroniques en seconde vie.

La réaffectation de dispositifs électroniques, notamment de smartphones en ordinateurs embarqués, s'inscrit dans une stratégie de réutilisation au cœur de l'économie circulaire. Cependant, l'absence d'outils et de méthodologies permettant d'évaluer la fiabilité de systèmes ayant déjà connu une première vie limite leur intégration durable dans de nouveaux usages. Cette étude propose une approche expérimentale visant à caractériser la dégradation de dispositifs électroniques réemployés à travers des tests de vie accélérés réalisés sur des smartphones réaffectés. L'objectif est de dresser un modèle de dégradation et d'identifier des indicateurs de fiabilité de haut niveau, tels que les performances système ou la consommation de courant, afin de permettre ensuite l'estimation de métriques standardisées comme l'état de santé ou le temps de vie utile restant. Les premiers résultats montrent notamment que la dégradation progressive de certains circuits digitaux, tels que les mémoires ou les processeurs, pourrait se traduire par une augmentation mesurable du courant consommé, révélant ainsi un lien exploitable entre l'usure matérielle et les indicateurs observables au niveau système. Ces travaux contribuent à la mise en place d'une base méthodologique pour l'évaluation rigoureuse de la durabilité de systèmes électroniques en seconde vie, renforçant ainsi la crédibilité technique et environnementale des stratégies de réemploi dans le domaine du numérique durable.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

DEPRES Gaël - Auteur présentateur **Fedrigoni**

REVERDY BRUAS Nadège; BRZOVIC Arnel; MARLIN Nathalie, **LGP2**

THENOT Victor, **FEDR**

BENI Valerio, **RISE**

DOMANN Gerhard, **Fraunhofer**

VIE Remy, **VFP**

SVECOVA Lenka, **LEPMI**

CARNIELLO Sara, **Joanne Institute**

## 3. PAPER PCB FOR SUSTAINABLE ELECTRONICS

The CircEl-Paper project, funded by the EU, is developing recyclable, cellulose-based printed circuit boards (PCBs) using printed electronics and bio-derived resins as a sustainable alternative to traditional fiberglass-epoxy PCBs. These energy-efficient, low-temperature manufactured boards demonstrate improved environmental performance, recyclability, and feasibility for use in consumer electronics like IoT, smart packaging, and medical devices.

CircEl-Paper project, funded by the EU, develops next-generation paper-based printed circuit boards (PCBs) using printed electronics to offer recyclable alternatives to fiberglass-epoxy PCBs. The substrate is a cellulose-based composite based on the modification of a paper from Fedrigoni impregnated and a bio-derivable resin from RISE. The developed composite presented improved water resistance, dimensional stability, fire resistance and lower chemical hazard when compared to phenolic papers (FR2). Subtractive and additive manufacturing techniques such as electroplating and screen-printing are used to deposit copper, conductive silver and dielectric layers, making the process energy-efficient and suitable for mass production. Demonstrators made by Joanneum institute, RISE and Fraunhofer (LED circuits, sensors...) validate the feasibility of the project. Among others key innovation of the developed paper composite is its recyclability, optimised by LGP2: materials are designed for easy disassembly and recovery, with standard recycling treatments enabling fiber and conductor recovery opening, in this way, new opportunity towards disposable and resilient consumer electronics. Preliminary life cycle assessments done by Joanneum Institute show a significant reduction in carbon footprint. CircEl-Paper demonstrates a sustainable path for electronics, enabling recyclable devices for IoT, smart packaging, and medical uses. Future work will focus on material and process optimization.





# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

LACROIX Marie-Anne - Auteur présentateur, IRISA/Université de Rennes/ENSSAT

CORLAY Vincent, Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

PERALTA Maxime, CEA

PELCAT Maxime, INSA/IETR

## 4. ELECIMPACT : VERS UNE BASE DE DONNEES OUVERTE ET COLLABORATIVE POUR L'ACV EN ELECTRONIQUE

Nous présentons ici l'un des travaux du GT2 du GDR DEFIE récemment créé : la mise en place d'une spécification pour une base de données collaborative, ainsi que le développement de la base elle-même, ouverte et collaborative, dédiée à l'ACV dans le domaine de l'électronique. Afin de mesurer l'impact environnemental d'un produit électronique sur tout son cycle de vie, il est nécessaire d'identifier de la donnée d'impact pour la fabrication, le transport et la fin de vie du matériel numérique mobilisé par le logiciel.

Cette donnée peut partiellement être couverte dans des bases de données commerciales d'analyse du cycle de vie (ACV). Cependant, ces bases de données peuvent avoir un coût prohibitif, limitant ainsi le nombre d'acteurs pouvant les utiliser, et avec des conditions d'utilisation parfois limitantes, car elles ne sont parfois utilisables qu'avec un seul logiciel d'ACV. En outre, ces bases de données fournies par des entreprises et associations sont sous la forme de boîtes noires ou grises, ne laissant que peu de liberté aux utilisateurs de s'approprier, de faire évoluer ou de questionner cette donnée.

Nous présentons ici un des travaux du GT2 du nouvellement créé GDR DEFIE : la création d'une base de données ouverte et collaborative pour l'ACV en électronique ainsi que les spécifications pour gérer ces données. L'objectif de ces travaux est de proposer, en collaboration avec des acteurs de la recherche et de l'industrie, une base de données multicritères, ouverte et collaborative. La production des données par les pairs pourra s'appuyer sur une structure favorisant les contributions volontaires et l'interopérabilité des données avec différents logiciels et bases de données traditionnellement utilisés par la communauté d'ACV.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

QUISBERT-TRUJILLO Ernesto - Auteur présentateur, VUILLERME Nicolas

AGEIS, Université Grenoble Alpes

## 5. ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE DESIGN PHASE OF THE INTERNET OF MEDICAL THINGS

This work investigates the environmental implications of Internet of Medical Things (IoMT) prototyping through Life Cycle Assessment of three case studies. The findings emphasize the pivotal role of material properties, versatility, and modularity in fostering resource-efficient and sustainable IoMT development.

Previous research has highlighted a lack of knowledge and understanding regarding the environmental impacts generated during the design of new products, particularly in prototyping, where high uncertainty and intensive resource use are common. In this context, and given their single-purpose, disposable, and iterative nature, Internet of Medical Things (IoMT) prototypes warrant further investigation to enhance understanding and mitigate their ecological footprint. Through exploratory analysis and Life Cycle Assessment (LCA) of three case studies at different scales—namely imagery sensors, pedometers, and smart homes—this work examines the factors that directly influence the recyclability of IoMT prototypes and, indirectly, the circularity of final devices. Our results underscore the critical importance of the intrinsic value and electrical properties of materials for both performance and circularity, as well as the cost–benefit of prototype versatility and modularity. These findings provide a sustainable pathway for developing IoMT systems via iterative yet resource-efficient prototyping, and offer valuable insights to support a comprehensive and pragmatic evaluation of digital health innovations based on this technology.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

FAYOLLE-LECOCQ Murielle - Auteur Présentateur; GODIN Christelle; VAUCHE Laura; CHAUMAT Elise; BOISSEAU Sébastien; FASSI Youssof; GWOZIECKI Romain; GUILLOU Suzanne; BOUTET Jérôme; HEIRIES Vincent; SERVIN Isabelle ; POULET Julie; PAIN Laurent;

CEA

## 6. ADDRESSING SUSTAINABILITY IN POWER ELECTRONICS R&D AT CEA LETI

Power Electronics (PE) are necessary for electrification required by the transition from fossil to low carbon energies. This poster presents researches in PE carried out at CEA-LETI to evaluate and decrease PE environmental impacts through LCAs (Life Cycle Assessments), eco-design tools, and increased lifetime solutions.

Several LCAs have been performed to identify the major contributions to environmental impacts of manufacturing components (GaN (1) and SiC (2) power transistors, magnetic components (3)). The GENESIS European project aims to decrease semiconductor manufacturing impacts.

Not only the component level but all the life cycle phases are taken into account in the FASTLANE European project. The Climate Change impact of SiC systems is assessed, using primary data collected within the consortium for each fabrication phases (substrate, device, module, inverter) till use phases of different use cases.

To integrate environmental considerations as early as possible, eco-design tools are being developed through the EECONNE European project relative to electronic waste reduction. This open-source tool helps designers to integrate sustainability through simplified LCA, design comparisons, guidelines, and educational content.

To extend system lifetime, predictive maintenance solutions based on Physics-Informed Machine Learning have been developed. These approaches can estimate the Remaining Useful Life (RUL) of MOSFETs (5), assess capacitor degradation (6), and non-invasively monitor power converters (7).

Collectively, these studies pave the way for the deployment of more sustainable power electronics systems.

- (1) L. Vauche et al, Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment (LCA) of GaN Power Semiconductor Device, Sustainability 2024, 16(2), 901
- (2) M. Fayolle-Lecocq et al, Simplified cradle to gate Life Cycle Assessment of SiC transistor fabrication, Symposium pour l'électronique et le numérique durables, Dec 2024, Grenoble, France. 2024. (cea-04837740)
- (3) S. Guillou et al, Recommendations for Life Cycle Inventory of magnetic components in Power Electronic, ECCE Europe 2025, Aug 2025, Birmingham, United Kingdom, (hal-05316095).
- (4) E. Chaumat, ACV du SiC : de la matière première au convertisseur, Symposium pour l'électronique et le numérique durables, Dec 2024, Grenoble, France
- (5) Y. Fassi et al., Physics-informed machine learning for robust remaining useful life estimation of power MOSFETs, Proc. IEEE ICPHM, 2024
- (6) Y. Fassi et al., Neural Network-Enabled Condition Monitoring of DC-Link Capacitors in Three-Phase Inverters, Proc. PCIM, 2025
- (7) Y. Fassi et al., Leveraging Ultrasound and Neural Networks for Non-Invasive Power Converter Efficiency Estimation, Proc. APEC, 2025



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

MONTMEAT Pierre - Auteur Présentateur, CEA, ERNOT Thierry; VACON Mélanie; LADNER Carine; THIOLON Adèle; FOURNEL Franck

CEA

## 7. ALTERNATIVES AUX SUBSTANCES PFAS POUR LA FABRICATION DES CIRCUITS ELECTRONIQUES EN 3 DIMENSIONS.

Dans le domaine de la fabrication des composants 3D, on propose ici de montrer dans quelles mesures il est possible de substituer aux polluants éternels PFAS des molécules non fluorées bien moins toxiques pour la santé et pour l'environnement.

Depuis les années 2000, on assiste à l'éclosion d'une nouvelle méthode de fabrication des composants électroniques : il s'agit de l'intégration en 3 dimensions (3D). Cette méthode consiste à empiler les composants les uns sur les autres au lieu de les assembler en deux dimensions sur un même support. Elle est censée réduire les délais d'interconnexion et la consommation électrique, mais surtout elle offre la possibilité d'intégrer au sein d'un même système des composants hétérogènes ou des matériaux différents.

Empiler des circuits nécessite la mise en œuvre de procédés de collage ou de démontage. Pour chacun, on utilise souvent des composés organiques fluorés de synthèse bien connus pour leur propriétés antiadhésives. Certaines de ces molécules appartiennent à la famille des PFAS (Substances poly ou perfluoroalkyles) dont le squelette présente au moins une liaison carbone-fluor. Cette liaison est particulièrement stable, ce qui fait que les PFAS génèrent une pollution durable associée à de graves risques pour la santé. Le 4 avril 2024, l'Assemblée Nationale a adopté une proposition de loi qui vise à réglementer l'utilisation de ces substances dangereuses.

Dans le domaine de la fabrication des composants 3D, on propose ici de montrer dans quelles mesures il est possible de substituer aux PFAS des molécules plus petites, non fluorées et bien moins toxiques. Deux axes feront l'objet de la présentation: la fabrication de circuits amincis et le collage auto-assemblé des puces.



Surface à contraste d'hydrophilie sans PFAS  
pour le collage des puces



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

LEFRANC Pierre - Auteur Présentateur; SALOMEZ Florentin; CREBIER Jean-Christophe; HELLER Gaëtan; PETIT Victor; SIMONCIN Nicolas; RIO Maud; CLEMENT Silvio

G2Elab/CNRS/UGA/GINP

**Université de technologie de Troyes, France**

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard FEMTO-ST (Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies, UMR 6174 (CNRS, Université Marie et Louis Pasteur et des ces deux établissements-composantes SUPMICROTECH et UTBM).

## 8. LA CONCEPTION ORIENTEE « MILIEUX » EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

La conception orientée « milieux » est proposée dans le cadre de la conception en électronique de puissance afin d'ouvrir une discipline technique aux sciences humaines et sociales et ce dans l'objectif de tendre vers une électronique de puissance « soutenable ».

Dans cette contribution, le concept de « milieux » est introduit pour enrichir l'activité du concepteur de convertisseurs d'électronique de puissance.

Mobilisé au XXème siècle entre autres par Jakob von Uexküll, puis réinvestit à l'époque du XXIe (Brault et al., 2024)[1] , le concept de « milieux » présente quatre propriétés : son échelle, sa constitutivité, la réflexivité et la normativité. Ainsi, comme dans le champ scientifique de la conception intégrée, la conception orientée « milieu » considère le concepteur non pas seulement comme un technicien, mais (re)devenant techno-logue, c'est-à-dire capable d'étudier ses objets techniques à son échelle, de par ce qui constitue son activité, en ayant un regard réflexif sur sa propre activité. La normativité qui s'en déduit, permet de ne pas séparer le technologue du cadre et des effets que produit son activité dans la société.

L'approche milieux appliquée à l'électronique de puissance invite à rebattre les cartes d'une conception traditionnelle très segmentée et spécialisée, basée principalement sur l'augmentation des performances, de la réduction des coûts et déconnectée des autres implications. Elle permet de mieux appréhender et tenir compte des conséquences positives et négatives des objets techniques et ce dans une démarche réflexive.

[1] Nicolas Brault, et al. Prendre soin des milieux. Editions matériologiques, 2024, 978-2-37361-448-0. <hal-04590726> ; <https://hal.science/hal-04590726>



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

CORLAY Vincent - Auteur Présentateur - Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

## 9. UN WIKI COLLABORATIF POUR LA TRAÇABILITE ET LA COMPARABILITE DES INVENTAIRES DE CYCLE DE VIE

Ce projet propose un wiki ouvert et collaboratif pour centraliser et structurer des données d'inventaire de cycle de vie issues du domaine public, comme des données de procédés. L'objectif est d'améliorer la transparence, la traçabilité et la comparabilité des inventaires dans le cadre des analyses de cycle de vie (ACV).

L'Analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode essentielle pour évaluer les impacts environnementaux des produits et services. Cependant, l'intérêt scientifique des résultats reste limité sans transparence sur l'inventaire sous-jacent. L'absence de description détaillée des procédés et des flux (technosphère/biosphère) compromet la reproductibilité, la comparaison entre études et la critique des résultats. Bien que les normes (ISO, PCR, PSR) assurent une certaine cohérence, elles ne résolvent ni l'hétérogénéité des bases de données ni l'opacité des inventaires. Pour un même cadre méthodologique, des écarts significatifs peuvent apparaître selon la base utilisée.

De nombreuses données publiques existent, notamment dans des publications académiques, mais elles sont souvent référencées par le produit final étudié et non par les procédés considérés dans l'inventaire, limitant leur réutilisation. Pour répondre à ces enjeux, un projet de wiki ouvert et collaboratif a été initié sur GitHub: <https://github.com/merce-fra/Wiki-on-processes-and-products-for-LCA>. Ce prototype vise à structurer et relier des inventaires publics au niveau des procédés. Ce wiki est discuté au sein du groupe de travail GT2 Axe A GDR DEFI (qui propose également une communication).

Les bénéfices attendus incluent la traçabilité, la reproductibilité, la comparabilité, la réutilisation des procédés et l'ouverture pédagogique.

# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

PASCAL Xavier - Auteur Présentateur, **CROMA**

GECZY Attila, **BME ETT**

RASKIN Jean-Pierre, **UCL**

CUARTIELLES David, **ARDUINO**

MARTINS Jean, **IGE**

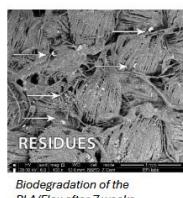
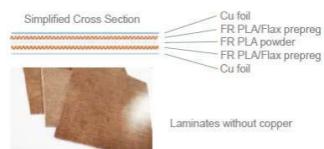
## 10. INSPIRED BY NATURE: ON THE ROAD TO MAXIMUM CIRCULARITY FOR CONSUMER ELECTRONICS BOARDS

The “DESIRE4EU” 2024-2028 EIC project is based on three essential pillars to achieve circularity in the consumer electronic board value chain by 2030: Manufacturing biosourced and biodegradable printed circuit board substrates compatible with industrial production equipment, modifying the design rules used in professional circuit design to introduce the notion of circularity, and optimizing a non-energy-consuming and non-polluting inspired-by-nature process for recovering critical metals at the end of life.

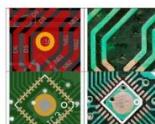
The “DESIRE4EU” European project aims to provide revolutionary and economically credible technologies for reducing the environmental footprint of electronic devices.

It is part of a portfolio of nine Pathfinder projects on responsible electronics funded by the European Innovation Council over the period 2024-2028. It is based on three pillars to achieve circularity in the consumer electronics value chain by 2030. Firstly, the objective is to manufacture composite substrates for printed circuit boards based on PLA and flax fibres, incorporating a flame retardant and a bio-based impregnating agent, while remaining compatible with industrial equipment for the production and assembly of electronic cards and applicable to consumer applications. Secondly, we aim to modify the design rules used in printed circuit board CAD software to take account of circularity and the “just enough” concept. Lastly, we are optimizing a hydrometallurgical bioleaching process that is energy-efficient and non-polluting by using nature-based solution: bacteria, which naturally live in mining areas and tailings are used to recover critical metals at the end of PCBs life cycle, in particular copper, a material that will be a major issue in the coming years because of the development of electric mobility solutions and AI hardware requirements.

### DESIRE4EU's FIRST PUBLISHED RESULTS



cross section of the substrate presents the structure and through-hole vias



“Just enough” mindset



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

LACROIX Marie Anne - Auteur Présentateur - IRISA/Université de Rennes/ENSSAT

## 11. COMMENT DEVELOPPER DES METHODES OUVERTES POUR L'ACV SOCIALE EN ELECTRONIQUE ?

L'ACV sociale aborde le sujet des impacts sociaux, peu mis en valeur mais néanmoins crucial dans le domaine de l'électronique. Ces travaux proposent de réfléchir à la création d'un outil libre et ouvert, accessible aux non-experts, pour que la communauté puisse s'emparer du sujet.

En parallèle de l'analyse de cycle de vie (ACV) environnementale s'est développée l'ACV sociale, qui consiste à mesurer les impacts sociaux d'un produit ou service. Malgré l'intérêt porté à ce sujet depuis de nombreuses années par la recherche et certains organismes comme l'ONU, ainsi que l'existence d'une norme ISO depuis 2024, les méthodes d'ACV sociale sont encore peu développées.

Comme pour l'ACV environnementale, l'un des principaux obstacles est la question des données : il existe peu de bases de données sur le sujet, avec des conditions d'utilisation limitantes. En outre, les impacts sociaux sont complexes à quantifier en raison de leur nature. En électronique, il s'agit néanmoins d'un sujet brûlant et largement documenté, avec des conséquences importantes à chaque étape du cycle de vie.

Pour impulser des efforts dans la prise en compte des impacts sociaux dans la conception des produits électroniques, une quantification de ces impacts est nécessaire, et l'ACV sociale est l'un des outils possibles. Ces travaux visent à présenter comment cet outil pourrait permettre aux non-experts de s'emparer du sujet. On abordera la nécessité de créer un outil ouvert et facile d'utilisation, et les obstacles que présentent un tel travail. La question sera approchée à travers un exemple pertinent d'ACV sociale pour l'électronique.

# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

AIGOIN Jeanne - Auteur Présentateur; MENDES Ivanie; D'AFFROUX Anaïs; SERVIN Isabelle

CEA-Leti

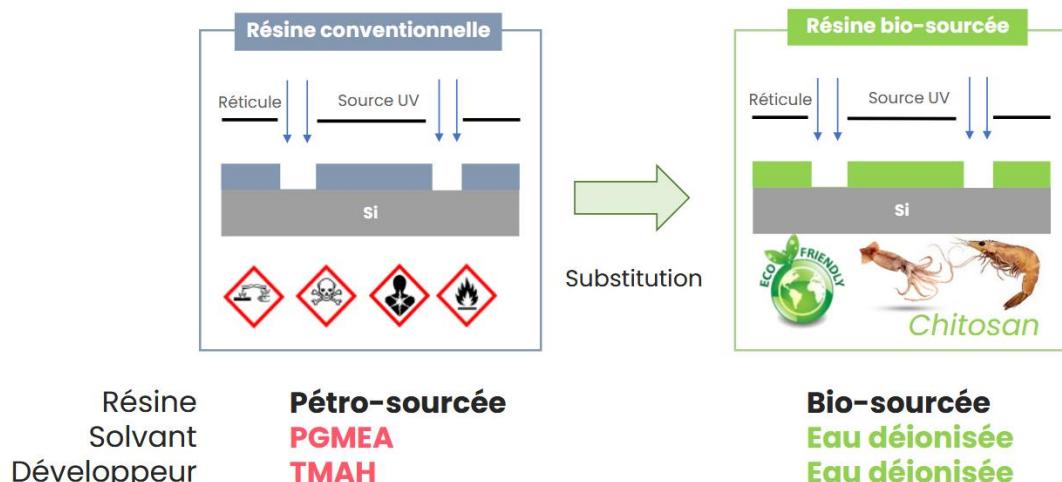
## 12. PROJET RESIN GREEN : DEVELOPPEMENT DE RESINES BIO-SOURCEES DE LITHOGRAPHIE POUR DES APPLICATIONS MIC

De nouveaux matériaux plus éco-soutenables sont à l'étude pour l'industrie des semiconducteurs. L'objectif est de développer une séquence de procédés de lithographie à faible impact environnemental.

Alors que la réduction de la consommation énergétique des composants est un axe majeur du développement de l'électronique durable, il est nécessaire de faire évoluer les procédés employés pour la fabrication des circuits intégrés dans une démarche éco-responsable. L'utilisation de matériaux moins polluants et plus abondants devient essentielle.

Actuellement, en photolithographie les résines conventionnelles utilisées dans l'industrie sont pétro-sourcées avec l'emploi de forts volumes de solvants toxiques pour l'environnement et la santé humaine. Le gain environnemental de la substitution de ces résines au profit de résines bio-sourcées à base d'eau pour des applications microélectroniques, a été récemment démontré. Le projet RESIN GREEN se focalise sur l'intégration de ces nouveaux matériaux dans un environnement type ligne pilote sur des substrats Silicium de 300mm). L'optimisation de la séquence de procédés de lithographie ont permis d'obtenir des résultats encourageants. Les formulations développées ont permis d'obtenir des motifs résolus sur substrat silicium. La suite de l'étude vise à se rapprocher des spécifications attendues sur le marché en vue d'un futur transfert industriel.

### Projet RESIN GREEN : Développement de résines bio-sourcées de lithographie pour des applications microélectroniques



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

PAVILO Chiara, Auteur Présentateur; CIONI Olivier; ALIAS Mélanie

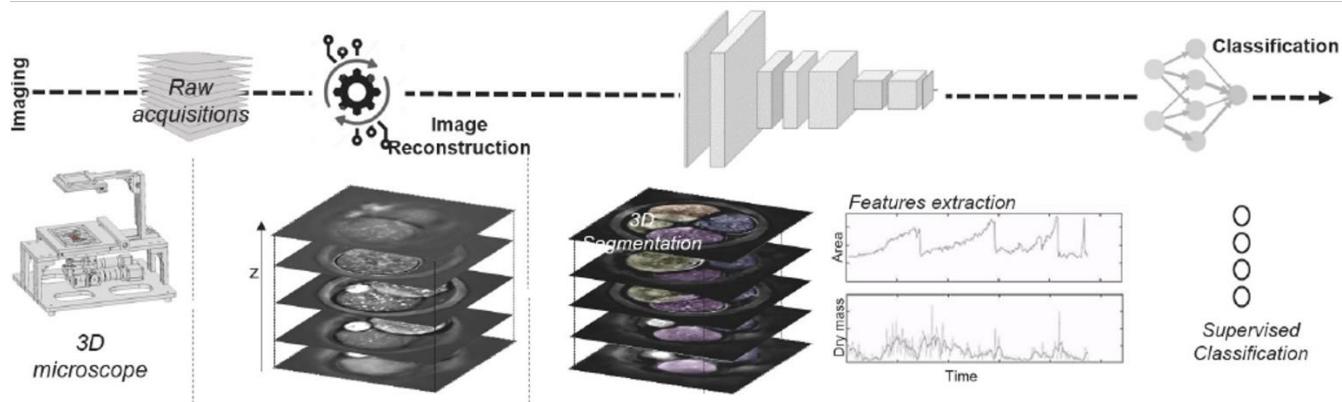
CEA Leti

## 13. ETUDE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX EN MICROSCOPIE APPLIQUEE A DES ECHANTILLONS BIOLOGIQUES

Une équipe de chercheuses et chercheurs s'est questionnée sur les impacts environnementaux d'un projet en microscopie appliquée à des échantillons biologiques. Un stagiaire a donc eu pour mission de mesurer l'empreinte de ce projet et de proposer des solutions d'éco-conception.

Le CEA-LETI collabore avec le CHU de Grenoble afin de développer un microscope pour suivre le développement des embryons de souris au cours du temps. Ce dispositif de microscopie tomographique très compact, intégré au sein d'un incubateur cellulaire, nécessite le recours à des algorithmes de reconstruction et d'analyse complexes, associée à des volumes 3D de grosse taille. En lien avec l'équipe éco-innovation du LETI, une étude a été réalisée sur le périmètre SOFTWARE de la reconstruction des images et identification de paramètres. Dans ce but, un bilan carbone a été établi mettant en exergue un poste majeur d'émission pour le stockage des données relativement aux calculs de reconstruction 3D. Différentes méthodologies de compression d'images ont été comparées afin d'identifier des paramètres de compression offrant un compromis optimal entre qualité expérimentale et réduction d'espace numérique, aboutissant à une baisse significative du volume occupé tout en conservant les performances nécessaires à l'analyse. Les résultats confirment qu'une approche systémique, combinant métriques environnementales et optimisation technique, peut générer des gains notables et facilement transposables à d'autres projets. Ce travail souligne l'importance d'intégrer dès la conception des chaînes de traitement des critères environnementaux, afin de contribuer à un numérique plus sobre et responsable.

### Périmètre d'étude



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

WEPPE Olivier - Auteur Présentateur; MARTY Thibaut; PREVOTET Jean-Christophe; PELCAT Maxime  
INSA Rennes/IETR

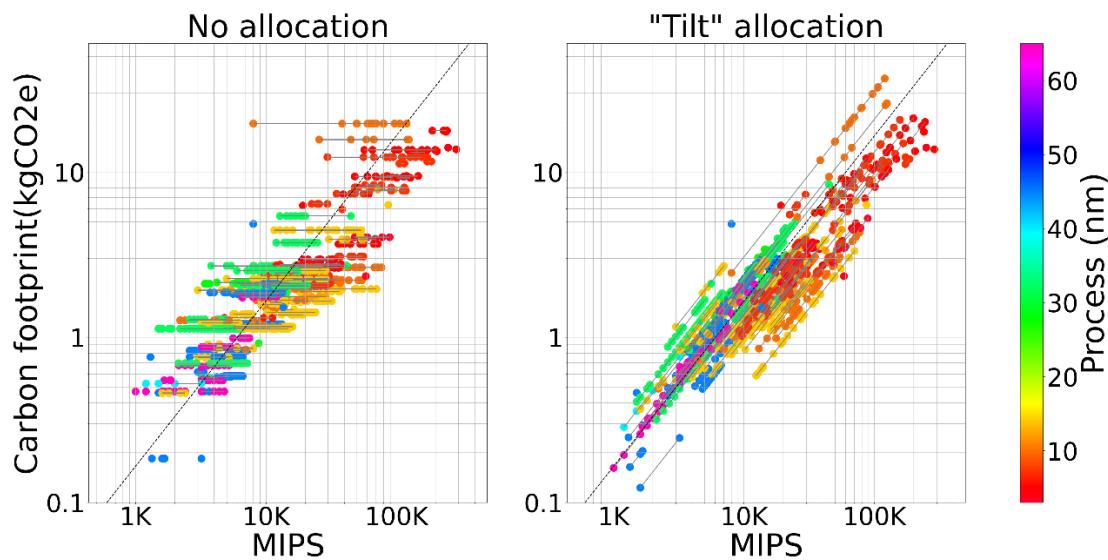
## 14. BEYOND SILICON AREA: Co-PRODUCT ALLOCATION FOR BINNING-AWARE CARBON FOOTPRINT OF PROCESSORS

L'estimation actuelle de l'empreinte carbone des processeurs est faussée car elle ignore le tri industriel ("binning") et attribue le même impact à tous les produits issus d'une même puce. Cette étude propose une nouvelle méthode d'allocation qui répartit cet impact en fonction de la valeur (prix ou performance), chargeant plus lourdement les modèles haut de gamme qui justifient l'existence de toute la ligne de production.

CPU manufacturing is a major contributor to the environmental footprint of digital technology. State-of-the-art LCA models evaluate carbon impact of CPUs based on chip area and lithography resolution, which results in a uniform carbon footprint for an entire range of products derived from the same design. However, this simplification masks the heterogeneity arising from industrial binning, where chips from the same lot are differentiated according to their performance.

To resolve this inconsistency, we propose a new analytical framework that considers the different variants of a processor as co-products. We develop and compare several allocation methods for the shared manufacturing impact, including an economic allocation (price-based) and a physical allocation (performance-based). Moreover, we model the influence of production yield by contrasting a uniform distribution hypothesis with a more realistic Gaussian distribution.

Our results reveal a significant redistribution of the environmental burden: the carbon impact of high-end processors is substantially higher than current estimates, while that of entry-level models is reduced. This methodological framework provides a fairer and more accurate picture, essential for guiding eco-design strategies and hardware acquisition policies for enhancing electronics sustainability.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

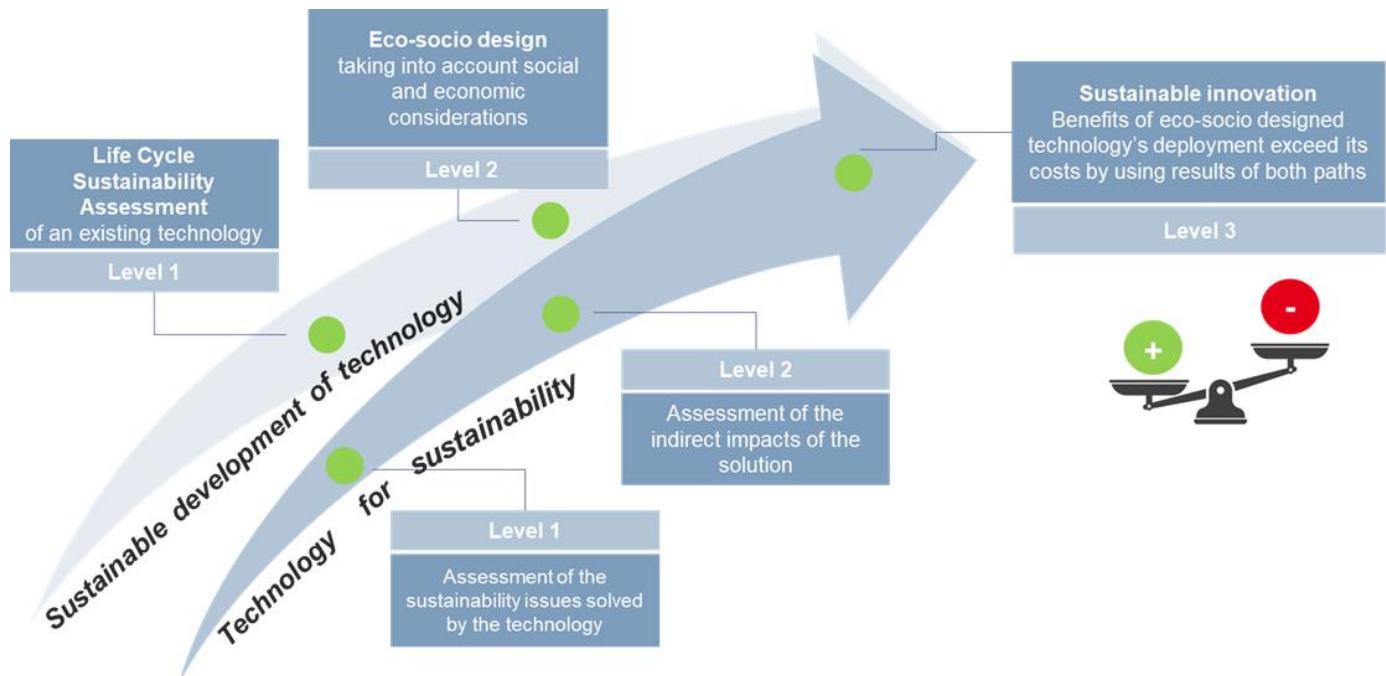
Le 16 décembre 2025, Grenoble

SANDIONIGI Chiara - Auteur Présentateur; PERALTA Maxime, BERREE Jean-François; ROBIN Bénédicte  
CEA

## 15. UNE APPROCHE STRUCTUREE POUR GUIDER LES DEVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES VERS LA SOUTENABILITE

La soutenabilité suscite un intérêt croissant, mais la diversité des concepts et des définitions dans le domaine technologique complique l'établissement d'un cadre cohérent. Prolongeant des travaux présentés par le CEA à Electronics Goes Green 2024, cette étude approfondit, enrichit et structure l'approche initiale et intègre une réflexion par niveaux de maturité technologique (TRL).

La soutenabilité suscite un intérêt croissant au sein des milieux académiques, industriels et institutionnels. Néanmoins, dans le domaine technologique, la coexistence de notions et de terminologies multiples, parfois définies de manière divergente, complique la structuration d'un cadre conceptuel cohérent. Des travaux publiés par le CEA à la conférence Electronics Goes Green en 2024 ont proposé un cadre visuel visant à positionner et orienter les projets de recherche et de développement technologique vers l'objectif d'éco-innovation. Ces efforts ont été prolongé après la publication de 2024 en raffinant, rediscutant et améliorant le cadre visuel. La prolongation des efforts a notamment conduit à l'introduction d'une réflexion structurée selon les niveaux de maturité technologique (TRL), permettant de relier les exigences de soutenabilité aux différentes phases d'évolution des technologies. Plusieurs discussions ont eu lieu avec académiques, industriels et lors d'une journée d'échange organisée au CEA autour de l'innovation soutenable. La journée d'échange a rassemblé plus d'une trentaine de collaborateurs CEA (ingénieurs chercheurs, responsables programmes et partenariats, etc.) dans des ateliers collaboratifs pour challenger et valider l'approche proposée. Par cette contribution, nous cherchons à renforcer la cohérence conceptuelle du domaine et à fournir un outil opérationnel favorisant l'intégration des objectifs de soutenabilité dans le développement technologique.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

DANES Loane - Auteur Présentateur, ROUGE Manon

IRT Nanoelec / Grenoble INP - Ense3

## 16. DES OUTILS PEDAGOGIQUES POUR UN NUMERIQUE PLUS RESPONSABLE

ChatGPT a dit :

“Les technologies numériques, omniprésentes dans nos vies, restent souvent perçues comme immatérielles alors qu’elles ont des impacts environnementaux et sociétaux méconnus. Pour y remédier, le programme Chif de l’IRT Nanoelec a conçu des outils pédagogiques visant à sensibiliser le public aux enjeux du numérique et à encourager une réflexion critique sur son usage.”

Les technologies numériques occupent une place centrale dans notre société : nous les utilisons tous les jours, plusieurs fois par jour, à la fois dans notre vie professionnelle et dans notre vie personnelle. En 2019, une étude estimait à 34 milliards le nombre d’équipements numériques répartis entre les 4 milliards de personnes utilisatrices à travers le monde.

Malgré leur omniprésence dans nos vies, les conséquences de ces technologies sur notre environnement et nos sociétés ne sont pas souvent conscientisées. Le numérique est souvent associé à un imaginaire de pureté, de magie : nous parlons de « dématérialisé », de « cloud » (nuage), ce qui lui enlève toute notion de matérialité ou d’impact. Selon une étude menée par l’Ifop et Eco Co2, 37% des 1003 employés du secteur tertiaire interrogés considèrent que le numérique a un impact positif sur l’environnement. Parmi les 63% reconnaissant les enjeux, beaucoup manquent de connaissance sur le sujet pour agir.

De ce constat est né le projet porté par le programme Chif de l’IRT Nanoelec de concevoir des outils pédagogiques pour sensibiliser aux enjeux du numérique et de l’électronique.

Les outils développés permettent d’apporter les bases de compréhension pour apprêter les impacts du numérique et encourager à se poser plus de questions. Nous espérons que leur variété permettra de s’adapter à votre besoin, à votre public cible et à vos contraintes.





# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

LE GARGASSON Pierre - Auteur présentateur - INSA Rennes

Alyzée Corre - INSA Rennes

## 17. PCBnCO: A CARBON INTENSITY MODEL OF FR-4 PRINTED CIRCUIT BOARDS BASED ON COMPANY DATA

Dans l'article « PCBnCO: A Carbon Intensity Model of FR-4 Printed Circuit Boards Based on Company Data », je propose deux modèles d'empreinte carbone des circuits imprimés ou PCB. Le premier modèle, basé sur des données extraites des rapports annuels des fabricants, donne une valeur moyenne. Le second modèle, basé sur deux entrées ACV (Analyse du Cycle de Vie) et l'exploitation d'une relation affine en fonction du nombre de couches, donne l'empreinte carbone du PCB en fonction du nombre de couches. Dans les deux cas, l'empreinte carbone peut être régionalisée en fonction du mix électrique.

L'an dernier au Symposium, je suis déjà venu présenter le premier modèle (Fig. 4). Mon article était alors en cours de soumission. Cette année, je propose de présenter le second modèle, l'empreinte carbone en fonction du nombre de couches (Fig. 5), qui est une relation affine. KiCad est un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) permettant de dessiner des PCB. J'implémente le second modèle dans un plugin KiCad, permettant de connaître l'empreinte carbone du PCB en cours de conception, et de proposer des configurations PCB alternatives de surfaces et du nombre de couches (Fig. 7).

**Abstract**—This paper examines available data to model the carbon intensity of Printed Circuit Boards (PCBs). Our aim is to provide insight into PCB design decisions and highlights the need for more robust data to enhance the accuracy of Life Cycle Assessment (LCA) of PCBs. A study of the literature reveals significant variations in reported results. To achieve a more accurate estimate of carbon intensity, we propose two approaches. First, we analyze the annual reports of the world's leading PCB manufacturers to determine an overall gate-to-gate carbon intensity. Second, independently of the first, we develop a cradle-to-gate carbon intensity model based on the number of layers. Additionally, we localize the PCB production by standardizing the electricity mix. **Index Terms**—electronics industry, printed circuit board, carbon footprint, global warming potential, life cycle assessment.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

LEFEBVRE Mathis - Auteur présentateur, VAUCHE Laura, Marc GELY, Marc SANSA

CEA-Leti, Université Grenoble Alpes

## 18. LIFE-CYCLE ASSESSMENT OF A MEMS OPTOMECHANICAL TECHNOLOGICAL PROCESS

We present the first life-cycle assessment (LCA) of an optomechanical MEMS technology fabricated using CEA-Leti's 200 mm VLSI process. The study quantifies the environmental impacts of fabricating silicon optomechanical resonators that combine MEMS and photonics on SOI substrates. The bibliography in this field is scarce, as most studies target purely electronic devices. Our study is representative of constraints of MEMS technologies, containing the most typical process steps. The functional unit is the clean room manufacturing of optomechanical MEMS on 200 mm wafers.

A life cycle inventory (LCI) was carried out using the hybrid top-down and bottom-up methodology developed at CEA-Leti for clean room manufacturing steps. The impacts' assessment was carried out using the SimaPro software and Ecoinvent database, with EF3.1 methodology. Results show that a few steps—photolithography, plasma etching, ion implantation, and chemical-mechanical polishing—dominate contributions to resource use, fossil fuel, climate change, and ionizing radiation. This first assessment provides a reference baseline, identifying clean-room energy and process gas substitution as key factors for impact reduction.

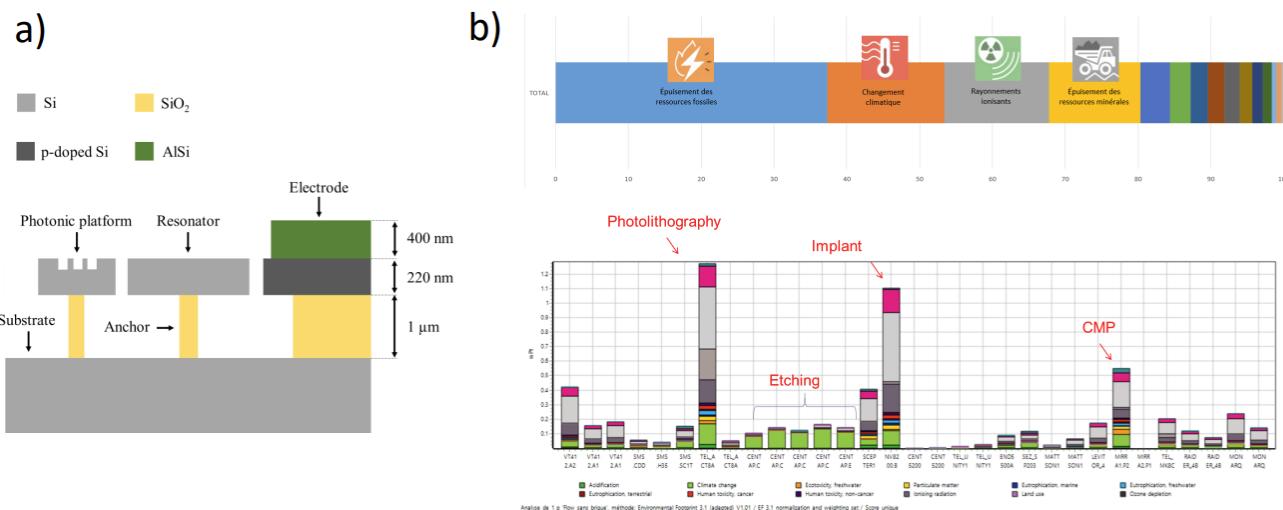


Figure: Cradle to gate life cycle analysis of the manufacturing of optomechanical MEMS using a 200 mm technological process at CEA-Leti's clean rooms. A) Technological process stack, based on silicon-on-insulator substrates, one active silicon layer and metallization. B) Overview of the results of the lifecycle analysis (single score, Pt). The main impacts are on resource use, fossil fuels, climate change and ionizing radiation. A big part of the contribution is concentrated on a few steps: photolithography, etching, implant and chemical-mechanical polishing (CMP).

# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

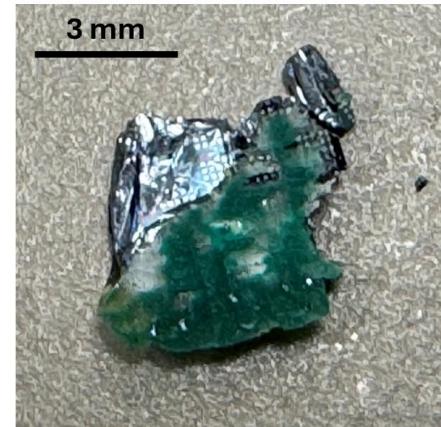
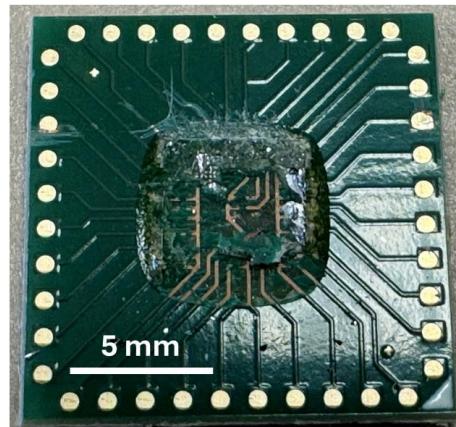
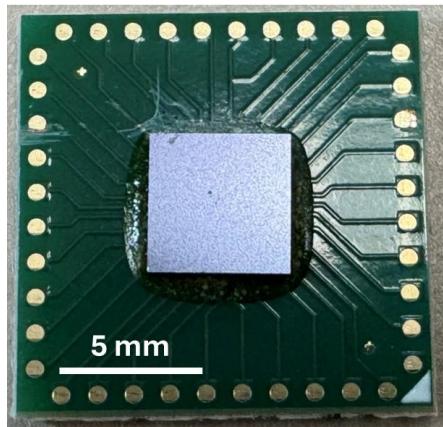
Le 16 décembre 2025, Grenoble

ECOFFEY Serge - Université de Sherbrooke, Canada

## 19. DEVELOPPEMENT D'EPOXY BIOSOURCEE POUR L'ASSEMBLAGE MICROELECTRONIQUE

Les résines époxy couramment utilisées en assemblage microélectronique sont majoritairement synthétisées à partir de composés non renouvelables et parfois toxiques qui proviennent de dérivés du pétrole. Les résines époxy biosourcées offrent déjà une alternative plus durable aux résines commerciales traditionnelles dans plusieurs domaines comme l'automobile, la construction, les revêtements, le biomédical, ou autres. Leur utilisation en microélectronique est peu explorée et freinée par des critères de performance exigeants. Ainsi, l'opportunité de proposer une alternative plus verte et moins毒ique aux résines dérivées de composés pétroliers pour l'assemblage microélectronique avancé mérite d'être approfondie.

Une première démonstration de résine pour des applications de "die-attach" a été faite. Les propriétés physicochimiques, comme la température de transition vitreuse ( $T_g$ ), la viscosité, et le coefficient de dilatation thermique (CTE), ainsi que mécaniques, comme la dureté ou la résistance au cisaillement, des mélanges époxy ont été mesurées et analysées. Les résultats ont montré que les résines époxy biosourcées développées présentent des performances comparables à deux résines commerciales équivalentes également analysées. Les propriétés remarquables comprennent des températures de transition vitreuse de l'ordre de 90 °C, une force d'adhésion (die shear) élevée de plus de 5000 PSI, une dureté supérieure à 80 Shore D, ainsi qu'une stabilité thermique au-delà de 300 °C.





# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

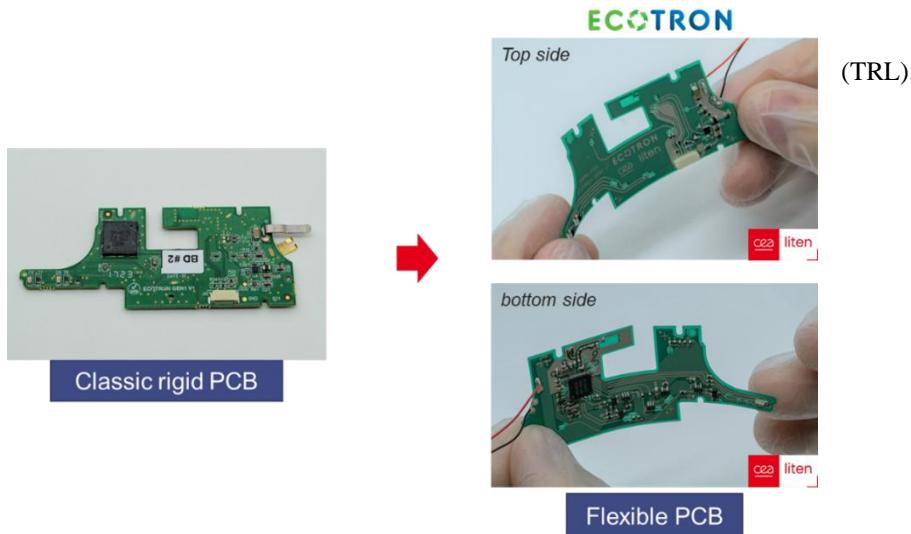
Le 16 décembre 2025, Grenoble

KADURA Lina - Auteur présentateur, TALLAL Jamal, RAT Venceslass, ALINCANT David, TOURNON Laurent, REYES Romain, ROUTIN Julien, SZAMBOLICS Helga, JABBOUR Lara

CEA

## 20. FABRICATION ADDITIVE DE CIRCUITS IMPRIMÉS : UNE VOIE VERS UNE ELECTRONIQUE PLUS DURABLE

L'impact environnemental des circuits imprimés (PCB) constitue une préoccupation croissante en raison de l'intégration rapide de l'électronique dans les objets du quotidien, entraînant une augmentation significative des déchets électroniques (E-waste) à l'échelle mondiale. Pour réduire l'impact environnemental des PCB, une solution prometteuse consiste à remplacer la fabrication soustractive standard par une fabrication additive d'impression, ce qui permet de diminuer la consommation de matières premières et d'énergie. Les conditions de procédé à basse température, et l'utilisation limitée de produits chimiques permettent l'impression sur une large variété de substrats, notamment à base de polymères recyclables et biosourcés. Ce travail aborde les principaux défis associés à la fabrication de circuits imprimés en sérigraphie, couvrant l'ensemble de la chaîne en partant de la conception, le développement du procédé, et jusqu'à la caractérisation finale. Un démonstrateur à quatre couches métalliques, intégrant plus de 100 vias traversants, 90 composants, et un assemblage double face, a été réalisé et validé sur la plateforme d'électronique imprimée et hybride du CEA-LITEN. Ce démonstrateur flexible entièrement fonctionnel, intègre une communication sans-fil, des capteurs de température et des diodes électroluminescentes (LED). Enfin, une Analyse de Cycle de Vie (ACV) comparative a également été réalisée sur le démonstrateur final.





# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

ADMANS Léandre - Auteur présentateur, Cea Paris Saclay

## 21. SYSTEME DE TRI ALLIANT VISION MACHINE ET RAYONS-X POUR LE RECYCLAGE DE METAUX CRITIQUES

Le déploiement accéléré de technologies visant à réduire notre empreinte carbone s'accompagne d'une forte augmentation de la demande en métaux (lithium, cobalt et nickel pour les batteries lithium-ion, argent, aluminium et cuivre pour les panneaux solaires, terres-rares pour les éoliennes...). De la même manière, la digitalisation de l'économie (intelligence artificielle, internet des objets...) entraîne une augmentation de la consommation de métaux, en particulier ceux qui entrent dans la composition des circuits imprimés (cuivre, or, palladium, tantale, tungstène...).

Ces évolutions technologiques et sociétales conduisent à une forte production de déchets. En particulier, la quantité de Déchets d'Équipements Electriques et Electroniques (DEEE) produites au niveau mondial a doublé entre 2014 et 2023 d'après l'organisation des nations unies.

Une industrie du recyclage est en train d'émerger en France pour le recyclage des technologies de la transition énergétique, comme les batteries de véhicules électriques ou de panneaux solaires. Cependant, le recyclage des petits équipements électroniques est plus difficile, due au fait qu'ils contiennent de nombreux métaux mélangés. Nous proposons une solution visant à réduire la complexité des flux de déchets électroniques, basée sur le tri de composants électroniques. Ce tri automatique est effectué en ligne avec des mesures multimodales (optique et rayons-X), augmentée par de l'IA.

# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

OMEZZINE Mohamed Amir - Auteur présentateur - **Grenoble Ecole of Management**,

PIGNI Federico - **Grenoble Ecole of Management**,

BILLECI Lucia, VITTORIO Meini, PROCISSI Giorgia, BACHI Lorenzo - **CNR**

## 22. FROM BIOMETRIC WEARABLES TO SUSTAINABLE PEDAGOGY: LINKING SENSORS, AI, AND EDUCATION

Our systematic review of 32 studies demonstrates how biometric wearables, including EEG headsets, heart-rate monitors, and galvanic skin response devices, are combined with artificial intelligence to analyze cognitive and emotional states in educational settings. These technologies support more personalized and inclusive learning by monitoring attention, stress, and engagement in real time. At the same time, they raise key issues for sustainable digital practices. On the one hand, sensors and AI can be viewed as “alternative metrics” for well-being, complementing traditional measures such as test performance. On the other hand, most current devices are energy-intensive, difficult to recycle, and prone to rapid obsolescence, which stresses the need for frugal design, reusability, and open approaches. By drawing on existing evidence, this proposal highlights insights at the intersection of sensors, pedagogy, and AI, and invites discussion on how to embed sustainability into the design and deployment of educational technologies.

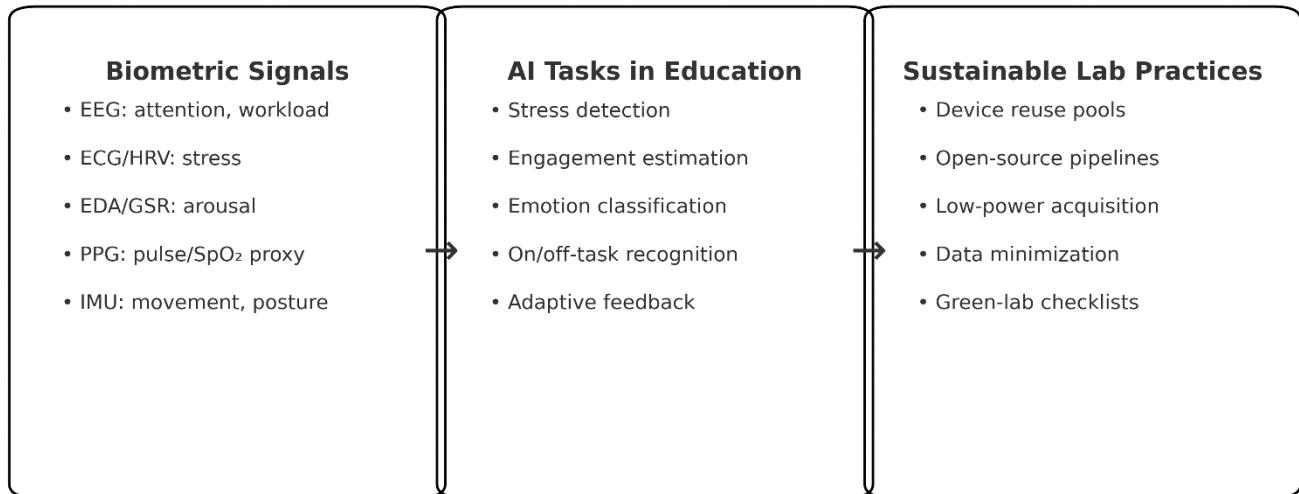


Figure 1. From biometric signals to AI tasks to sustainable lab practices for responsible, real-time learning diagnostics.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

CASSEAU Emmanuel - Auteur présentateur, QUÉMERAIS Philippe - ENSSAT-Université de Rennes

## 23. APPRENTISSAGE DE L'ACV ELECTRONIQUE AVEC L'OUTIL LOGICIEL EIME

Résumé : Nous souhaitons via ce poster partager notre expérience en formation à l'ACV électronique à l'aide du logiciel EIME à un public d'élèves ingénieurs (format enseignement : 10h de présentiel + travail personnel). Ce logiciel, simple d'usage, permet d'appréhender en quelques heures la problématique de la modélisation d'un produit électronique en vue de son ACV et d'identifier des pistes d'écoconception.

Proposition :

Nous souhaitons partager notre expérience en formation d'élèves ingénieurs à l'ACV électronique. Cette formation s'inscrit dans un enseignement d'éco-conception des équipements et services numériques. L'ACV y est présentée comme un outil d'aide à l'éco-conception ainsi qu'à la déclaration environnementale produit (ESRP, ...). Cet enseignement mobilise 10h en présentiel. Les 4 premières heures sont faites sous la forme d'un cours classique pour introduire les principes de l'éco-conception et la méthodologie d'ACV. 5h de pratique sur l'outil logiciel EIME (LCIE Bureau Veritas) couplé à la base de données CODDE® permettent ensuite 1) de prendre en main l'outil sur un cas d'étude existant - un multimètre - (environ 1h30), 2) de commencer par groupes de 3 élèves un cas d'étude simple - une carte électronique -, à partir d'un champ d'étude imposé et de la nomenclature de la carte (3h30). 2 solutions technologiques sont à étudier : carte électronique alimentée par piles ou via une récupération d'énergie par panneau photovoltaïque + batterie. Les étudiants poursuivent ce cas d'étude en temps libre puis restituent analyses d'impact et conclusions lors d'une présentation orale (1h). La facilité d'usage de EIME permet d'appréhender concrètement, en quelques heures, la problématique de la modélisation d'un produit électronique en vue de son ACV et d'identifier des pistes d'éco-conception.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

EYRAUD Grégory - Auteur présentateur, BAILLET Francis, SERVIN Isabelle

Univ. Grenoble Alpes, CEA, LETI

## 24. NUMERISATION DU SUIVI DE WAFER POUR LE SUIVI D'EQUIPEMENT ET DES PLAQUES DE QUALIFICATIONS

Le CEA-LETI, institut de recherche technologique du CEA, se concentre sur l'innovation et le transfert de technologies dans les domaines de la microélectronique, des nanotechnologies... Le Département des Plateformes Technologiques (DPFT) du LETI regroupe et assure que les infrastructures nécessaires (salles blanches, équipements, procédés) soient disponibles et fonctionnelles pour fabriquer des dispositifs conçus en interne ou pour des clients externes. Cette activité consomme un grand nombre de wafers (plaques de silicium), pour la qualification des équipements. Le DPFT utilise environ 40 000 wafers / an, qui ne sont que partiellement recyclés.

Ce projet vise à optimiser la réutilisation de wafers en créant des boucles de recyclage, afin d'utiliser un même wafer pour plusieurs tests réduisant ainsi l'impact environnemental.

Une analyse approfondie des 100 procédés les plus utilisés en 2024, permet une évaluation dynamique, révélant que 4 000 wafers environ sont potentiellement réutilisables. Ces données enrichies servent à créer une base de données graphe où l'IA intervient pour nous aider à identifier les nœuds importants afin d'optimiser les stocks et prioriser les actions à réaliser.

Mots Clefs : Réduction de l'impact environnemental, salle blanche, recyclage, microélectronique, base de données graphe, Intelligence Artificielle.

Neo4j : des données et des graphes - II. Déploiement. Sylvain Roussy 13 décembre 2017



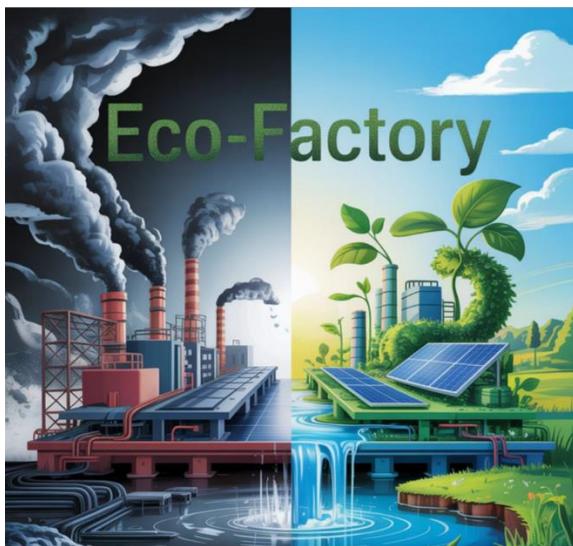
# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

GILET PHILIPPE - Auteur présentateur – GPI

## 25. COMMENT TRANSFORMER SA SOCIETE POUR RENTRER SUR LE CHEMIN DE LA DURABILITE DE FACON PERENNE

L'industrie micro-électronique, cœur des stratégies de souveraineté des différents états, constitue le socle numérique mondial avec un marché de 500 milliards d'euros en 2025. Cette filière génère une empreinte considérable : consommation de 130-140 TWh annuels, utilisation intensive d'eau douce, émissions de gaz fluors et production croissante de déchets toxiques. Elle contribue largement au dépassant les limites planétaires. Face à ce défi, les réponses nationales divergent. L'Europe déploie une stratégie proactive via le Green Deal, la CSRD et l'ESPR, intégrant double matérialité, VSME, .... Les États-Unis privilégient la compétitivité industrielle via le CHIPS Act, l'Asie développe des approches pragmatiques. Pour un dirigeant de PME -ETI du secteur la question qui se pose est : comment amener son entreprise sur le chemin de la durabilité ? Avec des forces motrices : pression réglementaire européenne, exigences GAFAM et HyperScalaires, attentes investisseurs ESG. Mais aussi des freins : coûts perçus prohibitifs, dépendances technologiques, résistances culturelles. Au cours de l'exposé, après avoir discuté de la problématique, une méthodologie structurée pour accompagner le changement en trois phases pour les PME-ETI sera présentée : amorcer par l'engagement directorial et la matrice de double matérialité ; optimiser par l'éco-conception et la formation ; institutionnaliser via les stratégies 9R et une Balanced Scorecard ESG intégrée.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

## Le 16 décembre 2025, Grenoble

FIDON Enola - Auteur présentateur – GUILLOU Suzanne, RIVOIRA Yannick, VAUCHE Laura

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, CEA/LETI-Minatec, Grenoble INP, LTM, Grenoble F-38054, France

## 26. LIFE CYCLE ASSESSMENT OF AN ELECTRONIC GRADE SILICON WAFER: A REVIEW AND UPDATE OF DATA

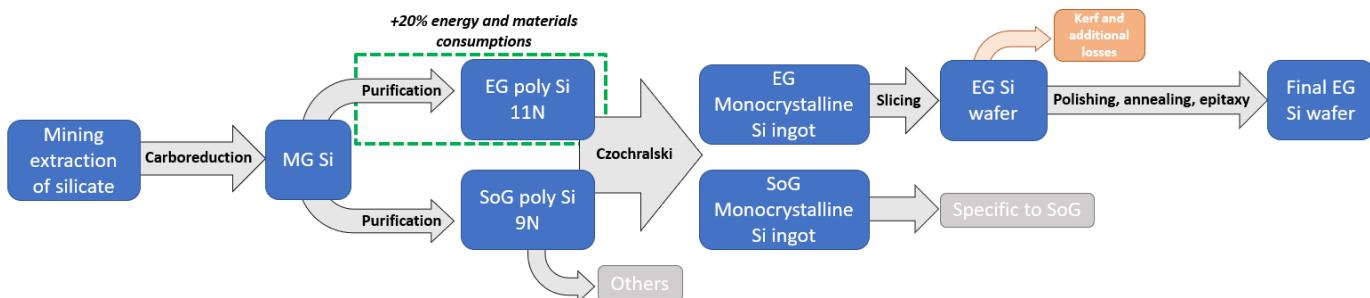
An updated life cycle assessment of electronic grade silicon wafer production is proposed, based on photovoltaic wafer data. The manufacturing processes of SoG and EG Si wafers are similar, key differences are thickness, shape, and purification, they are considered to compute the new environmental impact data.

Most integrated circuits are manufactured on electronic grade silicon (EG Si) wafers. However, due to the complexity and opacity of the supply chain [1], it is difficult to obtain reliable, consistent and complete Life cycle inventory (LCI) data on the production of EG Si wafers. The literature is more extensive for solar grade silicon (SoG Si) wafers [2]. However, their purity corresponds to 9N, while the purity of EG Si wafers is between 11 and 13N, which means the purification process is longer, more material- and energy-intensive.

This work proposes for the LCI of EG Si wafers: (i) an update with recent data available for SoG Si wafers; (ii) an adaptation of the purification stage with a 20% increase in consumption; and (iii) regionalized datasets depending on the production region.

[1] A. A. Ahmed, R. H. Reich, A. Di Maria, L. Boakes, C. Rolin, and K. Van Acker, ‘Regionalized Life Cycle Assessment of Silicon Wafers Supply Chains in the Semiconductor Industry’, Circ.Econ.Sust., vol. 5, no. 3, pp. 2347–2371, Jun. 2025, doi: 10.1007/s43615-024-00480-5.

[2] R. Frischknecht et al., ‘Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems’, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States), Jan. 2015. doi: 10.2172/1561526.





# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

FIDON Enola - Auteur présentateur, BARON Thierry, GORBANA Sophie, BELLEMIN-COMTE Amelie, GUERBER Sylvain, MARTIN Mickael

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, CEA/LETI-Minatec, Grenoble INP, LTM, Grenoble F-38054, France

## 27. ANALYSES DE CYCLE DE VIE (ACV) DE FILIERES D'INTEGRATIONS DE LASERS III/V SUR SILICIUM.

**Analyses de cycle de vie de filières d'intégrations de lasers III/V sur silicium par épitaxie de trous ou de boîtes quantiques sur substrat naturel de taille croissante (InP, GaAs ou Ge).**

La photonique sur silicium s'impose aujourd'hui comme une technologie fiable, économique et compatible avec les procédés CMOS existants. Le silicium présente en effet une transparence aux longueurs d'onde télécom (1,31 et 1,55 µm) et, grâce au contraste d'indice avec son oxyde, permet la réalisation de composants optiques performants. Toutefois, son gap indirect rend difficile l'intégration de sources lasers, ce qui a conduit à un recours croissant aux matériaux III-V à gap direct. Plusieurs filières d'intégration de lasers sur silicium ont vu le jour, mais leurs impacts environnementaux ainsi que l'utilisation massive de matériaux III-V soulèvent de nouvelles questions. Ce travail propose une comparaison d'analyses de cycle de vie (ACV) de la fabrication de lasers, différent par le substrat naturel sur lequel est épitaxiée la zone active : InP 4'', GaAs 6'' et Ge 12'' et par la structuration du laser. L'utilisation de substrats de diamètre croissant permet d'augmenter le nombre de lasers fabriqués par plaque, influençant directement l'impact global. L'étude met ainsi en évidence les impacts environnementaux entre, d'une part, des lasers hybrides à base de trous quantiques sur InP, et d'autre part, des lasers membranes à boîtes quantiques réalisables sur GaAs ou Ge, offrant des perspectives d'intégrations moins impactantes à grande échelle.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

GOTTELAND David - Auteur présentateur, BLANCO Sylvie, TRENDREL Olivier

Grenoble Ecole de Management

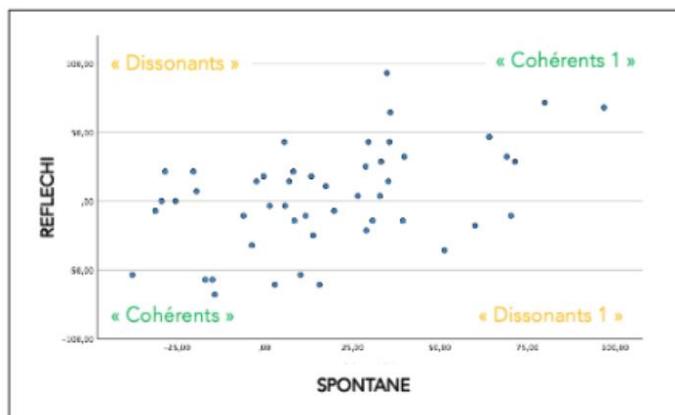
## 28. UNVEILING SUSTAINABILITY-DRIVEN MINDSETS: AN IAT-BASED TOOL TO EVALUATE PRO-ENVIRONMENTAL CULTURE

In ecosystems advancing sustainable microelectronics and digital technologies, aligning innovation with environmental responsibility requires a shared, deeply rooted pro-environmental culture among participants. This article demonstrates the value of measuring implicit environmental attitudes among people engaged in such collaborations.

We argue that the Implicit Association Test (IAT) offers a suitable methodology for this purpose. Unlike self-reported surveys, which are prone to social desirability bias and conscious framing, the IAT captures automatic, unconscious associations that more reliably reflect an individual's deep-seated environmental orientation.

Preliminary results using an IAT-based measurement tool enable the visualization of pro-environmental attitudes by mapping reaction times while associating environmental concepts and positive feelings. Color-coded graphs display individual profiles, accompanied with interpretive comments.

By administering the IAT before and after targeted training programs or other sustainability-driven initiatives, consortia can gauge not only knowledge uptake but also deeper cultural shifts. This insight enables the design of more impactful training curricula, fine-tuned to address resistance, strengthen engagement, and align practices with sustainability goals. Ultimately, such measurement should benefit the credibility and effectiveness of the consortium's sustainability commitments.



- « Cohérents 1 ». Les personnes ont une orientation pro-environnementale cohérente en spontané et en réfléchi. Ce sont des **ambassadeurs** de la culture pro-environnementale.
- « Dissonants 1 ». Les personnes ont une faible orientation pro-environnementale en réfléchi, mais forte en spontané. Ce sont des **ambassadeurs potentiels** de la culture pro-environnementale, qui cependant ne révèlent pas leur orientation pro-environnementale en spontané.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

PIERRAT Lambert - - Auteur présentateur - **LJ-CONSULTING**

29. ANNULE



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

ZAHMOUL Rim-Auteur présentateur - Université de Rennes/ESIR/ESOS/IETR

## 30. INTEGRATING SUSTAINABILITY INTO ENGINEERING EDUCATION

ESIR will integrate sustainability into engineering education through upcoming courses, technical training, and industry partnerships, developed within the framework of the ESOS project. Students will acquire hands-on skills in sustainable electronics through lifecycle analysis, eco-design, and open hardware practices, preparing them to contribute to global sustainability goals.

Sustainability is now a key pillar in engineering education to address urgent environmental, social, and economic challenges. In parallel with courses on ecological and societal transition offered at the University of Rennes, ESIR (École Supérieure d'Ingénieurs de Rennes) will also integrate sustainability through upcoming courses and technical trainings focused on sustainable electronics and eco-design. Practical work will include lifecycle analysis of electronic components, providing students with hands-on experience in environmental impact assessment. Additionally, planned partnerships with industry will enable students to apply sustainable engineering principles in real-world projects as mentioned in [1].

This approach, centered around the existing ESOS project (Electronic Sustainable, Open & Sovereign), equips future engineers with essential skills in energy-efficient design, sustainable lifecycle management, and open hardware innovation. The presentation at the symposium will explain how ESIR fosters the development of engineers ready to contribute to sustainable technological advancements aligned with global sustainability goals, by combining theory, practical experience, and industry collaboration.

[1] Sabri, O. K. (2025, June). *Rethinking sustainability in engineering education: a call for systemic change*. In *Frontiers in Education* (Vol. 10, p. 1587430). Frontiers Media SA.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

**31. ANNULE**

# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

NITOT Tristan - Auteur présentateur - OCTO Technology

## 32. OPTIMISER LE LOGICIEL POUR FAIRE DURER LE MATERIEL : L'APPROCHE EROOM



"Ce qu'Intel vous donne, Microsoft vous le reprend", disait-on dans les années 2000, ce qui est une façon de décrire la loi de Moore et la loi de Wirth. Avec la nécessité de réduire l'empreinte du numérique, comment optimiser le logiciel pour faire durer le matériel et ainsi amortir sur une durée plus longue l'impact de la fabrication du hardware ?

Le constat est simple : la loi de Moore a structuré toute l'industrie du numérique ces presque 60 dernières années. Mais avec l'accélération exponentielle du matériel, une autre loi a été révélée, la loi de Wirth, qui dit que le logiciel ralentit aussi vite que le matériel accélère. Et malheureusement, elle se vérifie aussi.

À une époque où il convient à la fois d'être souverain et stratégiquement autonome, de réduire les budgets et d'arrêter de ruiner la planète, l'optimisation logicielle va permettre de garder son matériel plus longtemps. Comme c'est la fabrication du matériel qui consomme le plus de ressources naturelles, économiser de la puissance informatique permet ainsi de créer de nouveaux usages tout en réduisant massivement l'empreinte environnementale du numérique.

En optimisant d'un facteur deux les logiciels existants tous les deux ans, on dispose de deux fois plus de ressources informatiques, mais sans changer le matériel. Un peu comme la loi de Moore, mais sans l'empreinte écologique qui va avec. C'est ce qu'on a appelé l'approche EROOM (Moore, mais à l'envers).

Comment s'y prendre ?

Le groupe de travail EROOM s'y est attelé en concevant une méthodologie, forcément Open Source mise à la disposition de tous pour optimiser de façon ponctuelle les parties très suboptimales d'un système d'information et ainsi atteindre le Graal : continuer à innover, faire plus avec moins et s'inscrire dans une démarche durable.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

ANCEAU Stephanie - Auteur présentateur, CHARTIER Isabelle – CEA-Leti Grenoble

## 33. REEMPLOI DES PRODUITS ELECTRONIQUES COMPOSÉS DE MéMOIRES FLASH PAR IRRADIATION NON DESTRUCTIVE

Projet ADEME REPEX : Réemploi des produits électroniques composés de mémoires flash par irradiation non Destructive.

Il y a trois piliers dans le projet REPEX, le premier concerne la recherche fondamentale avec l'étude des effets des rayons X sur les composants, le deuxième concerne la recherche industrielle et les éléments constitutifs de la machine d'effacement et le troisième pilier représente les pistes d'écoconception et de performances environnementales. Les piliers sont décrits succinctement ci-après. Le premier pilier s'appuie sur 4 tâches. : la première vise à analyser les composants pour identifier les zones mémoires à effacer, la deuxième à prédir par simulation les doses minimales pour effacer les mémoires, la troisième à mettre en œuvre expérimentalement les effacements avec une source RX de laboratoire et la quatrième à identifier les éventuels défauts induits par ces irradiations. Le deuxième pilier s'appuie sur 5 tâches. Tout d'abord une étude d'usage et de marché puis l'optimisation des conditions d'effacement sur les produits entiers (téléphone, SSD) et la mise en place d'un traitement automatique des objets par reconnaissance. Par la suite dès la conception et la fabrication du nouveau dispositif industriel d'effacement par RX sera menée et les clients potentiels seront identifiés. Enfin la certification du dispositif et sa dissémination sera engagée. Le troisième pilier s'appuie sur deux tâches. Il s'agit d'évaluer les pistes d'écoconception et de performances environnementales. Dans un premier temps, l'ACV du prototype initial permettra l'éco-conception du nouveau dispo.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

SAILLENFEST Léo- Auteur présentateur, STOBBE Lutz

Fraunhofer IZM

## 34. HOW COULD NEW ECO-RELIABLE DESIGN REDUCE THE OVERALL ENVIRONMENTAL FOOTPRINT OF PCBs ?

The presentation argues that as electronics grow, IC front-end manufacturing and PCB production have comparable carbon footprints, making optimization of PCB design and manufacturing—through eco-design and circular-economy principles like lifetime extension, standardization, modularity, and repairability—urgent. It introduces “eco-reliability,” balancing environmental impact, reliability, and repairability, and calls for revised design rules and lifetime-extension frameworks to lower impacts across manufacturing, use, and end-of-life.

The electronics market continues to expand, with projected growth of 6% annually over the next 5–10 years, significantly increasing its environmental footprint. This presentation will first compare the global carbon footprint of IC front-end manufacturing with the PCB production, highlighting their comparable environmental impact and the urgent need for optimizing PCB design and manufacturing.

Extensive research on eco-design has focused on reducing the environmental footprint of PCBs through strategies such as improving manufacturing panel area utilization, layer stack-up optimization including layer thickness and material selection, as well as other measures for a better design for manufacturability. In recent years, the circular economy has also gained prominence, emphasizing not only recycling but also extending product lifetimes. However, this shift introduces new design principles related to thermal and mechanical design (reliability) as well as standardization, modularization and repairability which extends the scope of eco-design.

This presentation introduces the emerging concept of eco-reliability, focusing on trade-offs between environmental footprint, reliability and repairability and emphasizing the need to rethink design rules to incorporate among others lifetime extension frameworks. By addressing these challenges, we aim to promote less impactful PCB designs for the manufacturing, use, and end-of-life phase leading to a more sustainable electronics industry.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

VERNAY Anne-Lorène - Auteur présentateur - **Grenoble Ecole de Management**

RANVILLE Adélie - **Grenoble Ecole de Management**

GENET - Corine. **Grenoble Ecole de Management**

PINKSE - Jonatan. **Kings college London**

## 35. LES TECHNOLOGIES NUMERIQUES PEUVENT-ELLES FAVORISER LA DECARBONATION DES ENTREPRISES ? UNE ETUDE EMPIRIQUE DU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION

Face au changement climatique, les entreprises mettent en œuvre des activités de gestion du carbone afin de décarboner leurs opérations. Parallèlement, les technologies numériques suscitent de nombreux espoirs parmi les chercheurs et les décideurs politiques quant à leur capacité à contribuer à la décarbonation. Il est attendu que, si elles sont déployées de manière stratégique, une double transition soit possible, permettant aux entreprises de se digitaliser et de se décarboner simultanément. En effet, les technologies numériques remplissent plusieurs fonctions qui peuvent faciliter les activités de gestion du carbone : le monitoring (potentiellement en temps réel), l'analyse de grandes quantités de données et la réalisation de prévisions, la planification via la simulation ou la création de scénarios pour soutenir la prise de décision, l'exécution par l'automatisation, et le partage des connaissances en réduisant les asymétries d'information.

Cependant, l'utilisation des technologies numériques ne conduit pas nécessairement à une réduction des émissions de carbone, et la littérature reflète parfois une vision simpliste de type « poussée technologique ». Les chercheurs ont souligné la nécessité d'examiner les mécanismes reliant le numérique et la durabilité. Cet article vise à contribuer à cette réflexion en posant la question suivante : *comment les entreprises utilisent-elles les technologies numériques pour réaliser leur transition vers la neutralité carbone ?*

Nous répondons à cette question à travers une étude qualitative de 16 entreprises du secteur de la construction (depuis les producteurs de matériaux jusqu'à la conception, la construction et la rénovation de bâtiments). Nous analysons comment les entreprises utilisent les technologies numériques pour mettre en œuvre des activités de gestion du carbone en deux étapes. Tout d'abord, nous examinons comment elles mobilisent ces technologies pour monitorer, analyser, planifier, exécuter et partager des connaissances. Pour chaque fonction, nous analysons également pourquoi les entreprises ne parviennent pas à exploiter pleinement le potentiel des technologies numériques.

Nous avons aussi constaté que l'analyse fonction par fonction ne permettait pas de révéler toutes les limites ou difficultés évoquées lors des entretiens. Cela s'explique par le fait que les technologies numériques ne fonctionnent pas de manière isolée, mais sont intégrées dans des systèmes plus larges de boucles de rétroaction. Autrement dit, nous posons l'hypothèse que les fonctions numériques opèrent dans des boucles de contrôle numériques, où les différentes fonctions s'alimentent mutuellement. Nous analysons ces boucles de contrôle et identifions inductivement trois caractéristiques qui influencent la capacité des entreprises à exploiter pleinement les technologies numériques : i) le moteur de la boucle de contrôle (conformité, demandes des clients ou efficacité opérationnelle) ; ii) le niveau d'ouverture des frontières (de nul, lorsque l'entreprise maîtrise entièrement la boucle, à élevé, lorsque la coordination inter-entreprises est nécessaire) ; iii) le type de transformation exigée au niveau de l'entreprise (transformation numérique, transformation carbone ou un alignement entre transformation numérique et carbone).

Nous utilisons ces caractéristiques pour discuter des défis supplémentaires liés à l'utilisation des technologies numériques dans la mise en œuvre d'initiatives de gestion du carbone. La recherche montre que, bien que les technologies numériques aient le potentiel d'aider les entreprises à se décarboner en facilitant la gestion du carbone, dans la pratique, elles rencontrent de nombreuses difficultés qui limitent ce potentiel. Ces limites concernent à la fois les fonctions numériques individuelles et la manière dont elles s'intègrent dans des systèmes plus larges de boucles de contrôle numériques. Nous proposons également un cadre d'analyse pour mieux comprendre les obstacles à l'utilisation des technologies numériques dans une optique de décarbonation.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

LEBRUN Nicolas Auteur présentateur - CEA

FOURNIER Claire - CEA

ASSOUS Myriam – CEA

BOREL Stephane – CEA

ROMAN Antonio – CEA

ROYER Alexis - CEA

CHEVOLLEAU Thierry - CEA

## 36. NETTOYAGE APRES GRAVURE PLASMA DE STRUCTURES PROFONDES DE TYPE TSV

**Le développement de capteurs optiques à intégration 3D peut permettre à ces micro-dispositifs d'être plus économies en énergie lors de leur utilisation. Ce travail se concentre sur leur procédé de fabrication et plus précisément sur l'étape de nettoyage après la gravure plasma de Through-Silicon Vias (TSV), afin d'améliorer la fiabilité du dispositif tout en limitant si possible l'impact environnemental du procédé de fabrication.**

Le CEA-Leti travaille sur le développement de capteurs ayant une architecture 3D, dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique de ceux-ci tout en permettant l'éventuel ajout de nouvelles fonctionnalités. Pour que ces capteurs puissent être industrialisables dans des filières 300mm de semiconducteurs, standard de cette industrie, nous utilisons l'approche dite « wafer-to-wafer » consistant à superposer différentes plaques selon leur utilité (pixel, mémoire, logique...). De nouvelles problématiques de fabrication apparaissent alors, notamment autour de l'utilisation du collage hybride pour superposer les plaques, et de tranchées appelées TSV (Through-Silicon Vias) pour réaliser l'interconnexion électrique entre les différentes couches.

Ce travail s'intéresse particulièrement au procédé de fabrication des TSV, nécessitant une étape de gravure plasma profonde et difficile à caractériser du fait des dimensions de la structure (6µm de profondeur pour 1µm de diamètre dans notre cas). Il est cependant important de s'assurer que la gravure plasma ne laisse pas de résidus dans la structure, ce qui pourrait nuire aux propriétés électriques et à la fiabilité du dispositif. Nous explorons donc diverses méthodes de retrait de résidus de gravure, y compris via l'utilisation d'un solvant plus éco-responsable. Une étude préalable vise à vérifier la compatibilité de ce solvant avec les matériaux exposés, puis une seconde partie de l'étude consiste à évaluer son efficacité de nettoyage.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

CHEDOTEL Benjamin – Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR

MARTY Thibault - Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR

BERRY François - Institut Pascal, Université Clermont-Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont

PELCAT Maxime - Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR

## 37. DEFIS METHODOLOGIQUES D'UNE ACV DE SMARTPHONES

Les ACVs de présélection, permettant de réaliser une évaluation rapide des impacts pour identifier les composants et activités les plus significatifs, peuvent être limitées pour évaluer les impacts environnementaux des systèmes électroniques complexes, car elles risquent de surestimer ou sous-estimer certains composants clés. À partir des ACV des PCBAs des iPhone 16 et Galaxy Note II, une méthode simple est proposée pour améliorer la précision et la fiabilité de l'identification des impacts, en particulier ceux liés à la fabrication.

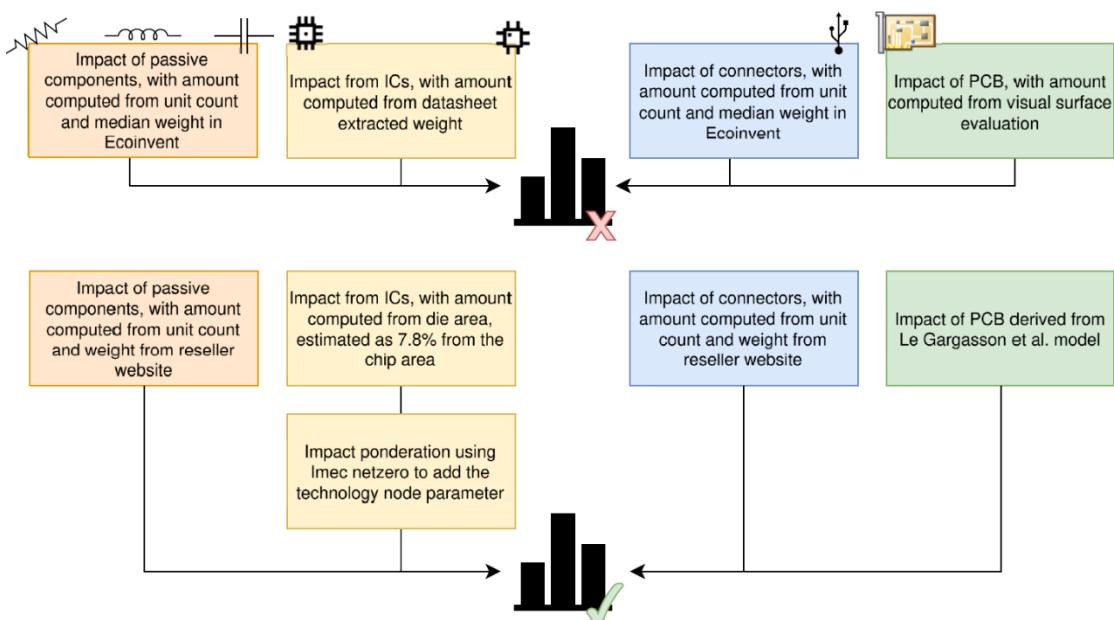
"L'analyse du cycle de vie environnementale (ACV) est de plus en plus utilisée pour évaluer les impacts environnementaux des dispositifs et services tout au long de leurs phases de fabrication, d'utilisation et de fin de vie.

Les ACV sont généralement réalisées en plusieurs étapes. Après avoir défini l'objectif et le champ de l'étude, une première évaluation rapide des impacts, appelée ACV de présélection (ou screening ACV), vise à identifier les activités et composants ayant un impact significatif.

Ensuite, une méthode de seuil (cut-off) est appliquée afin de concentrer les étapes suivantes de l'ACV sur les activités et composants représentant plus qu'une part minimale des impacts.

Enfin, une étude complète est menée, incluant un inventaire détaillé du cycle de vie, des mesures, une évaluation des impacts et une interprétation. Cet article met en avant la prédominance des impacts carbone liés à la fabrication dans les systèmes embarqués. Nous soulignons les limites des ACV de présélection pour évaluer des systèmes électroniques complexes comme les smartphones, et proposons une méthode pour les surmonter.

À partir des ACV des PCBAs des iPhone 16 et Galaxy Note II, nous montrons que ces évaluations peuvent surestimer ou sous-estimer certains impacts, biaisant l'identification des composants clés. Une méthode simple est proposée pour en améliorer la précision et renforcer la fiabilité des résultats."



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

Vincensini Marion– IC'Alps

## 38. COMMENT INITIER ET STRUCTURER UNE DEMARCHE DANS LE DEVELOPPEMENT DURABLE EN ETANT UN MAILLON DANS LE CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT

IC'Alps est une PME spécialisée dans la conception sur mesure de circuits intégrés en partant d'un cahier des charges du client et pouvant aller jusqu'à la livraison de circuits en boîtier et testés. Les activités menées au sein d'IC'Alps sont la conception de la spécification à la génération des plans pour la fabrication (fichier gdsII du circuit) et la validation sur banc de test des premiers circuits pour vérifier l'implémentation et valider la spécification. Dans le contexte de développement durable, IC'Alps a débuté, depuis quelques mois avec un groupe de travail interne (constitué de concepteurs de différents métiers et responsable équipe), une démarche pour comprendre le cycle de vie d'un produit dans les semi-conducteurs, la nature des impacts sur l'environnement, les ressources et autres.

IC'Alps a réalisé un premier LCA centré sur ses activités, intégrant toutes les étapes pour aller jusqu'au produit fini, avec un premier recensement des différents impacts classifiés directs, indirects ou externes et une réflexion sur les enjeux et défis associés.

Les objectifs visés à partir de ce premier LCA sont les suivants :

- Se focaliser sur les activités de IC'Alps ou de ses partenaires, qui ont le plus d'impact sur l'environnement
- Avoir un point de départ pour quantifier les améliorations apportées par rapport à l'existant
- Pouvoir engager un dialogue avec les parties prenantes (partenaires et clients) sur le développement durable

Nous présenterons les différents impacts comme définis :

- Les impacts directs pour lesquels IC'Alps peut agir directement : utilisation de serveurs de calcul, les déplacements professionnels, ....
- Les impacts indirects pour lesquels IC'Alps peut agir auprès de ses partenaires avec des éléments d'entrée comme le choix de la technologie, la surface du circuit, ou les patterns de test.
- Les impacts externes pour lesquels IC'Alps pourraient contribuer pour donner un cadre normatif au développement durable comme définir des critères de sélection à appliquer.

Et nous pourrons aussi partager les défis que nous percevons à l'issue de cette première étape : disponibilité de données pertinentes, tentation de reporter le problème en amont ou aval de ses propres activités, une réalité économique à prendre en compte et autres.

IC'Alps est une PME spécialisée dans la conception sur mesure de circuits intégrés en partant d'un cahier des charges du client et pouvant aller jusqu'à la livraison de circuits en boîtier et testés. Les activités menées au sein d'IC'Alps sont la conception de la spécification à la génération des plans pour la fabrication (fichier gdsII du circuit) et la validation sur banc de test des premiers circuits pour vérifier l'implémentation et valider la spécification.

Dans le contexte de développement durable, IC'Alps a débuté depuis quelques mois une démarche pour comprendre le cycle de vie d'un produit dans les semi-conducteurs, la nature des impacts sur l'environnement, les ressources et autres.

Un groupe de travail interne à IC'Alps a commencé des recherches bibliographiques, a participé à la summer school organisée par Grenoble INP-UGA/Phelma avec Nanoelec en juin 2025, a rencontré différentes personnes ou organismes impliqués dans l'éco conception.

Comme première étape, le groupe de travail s'est fixé de réaliser un premier LCA (Life Cycle Assessment) centré sur les activités de IC'Alps, avec une première définition des différents impacts classifiés directs, indirects et externes et une première réflexion des enjeux et défis sollicités. Le but final de cette LCA est de comprendre quels sont les processus liés à l'activité d'IC'Alps les plus impactants pour l'environnement. Ainsi, le groupe de travail sera à la fois capable de prioriser des actions visant à réduire l'impact environnemental, tout en ayant un point de départ pour quantifier les améliorations qui devront suivre l'analyse de cycle de vie. En tant que maillon d'une chaîne d'approvisionnement complexe, IC'Alps souhaite déterminer quels



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

sont ses leviers d'actions en tant que maison de conception « fabless », tout en engageant un dialogue sur le thème de l'impact environnemental avec ses fournisseurs et partenaires.

La cartographie des processus est la première étape de cette analyse de vie. Les impacts directs sur l'environnement sont ceux sur lesquels IC'Alps a directement la capacité d'agir (scope 1 d'une analyse de cycle de vie), par exemple l'utilisation des serveurs de calculs nécessaires aux simulations électriques.

S'il est nécessaire de prendre en compte ces impacts pour réaliser une analyse de cycle de vie complète, les impacts indirects liés à l'intégralité de la chaîne de conception d'un circuit intégré sont à quantifier en priorité car perçus comme majoritaires. Ainsi, le groupe de travail a pour objectif de lister et quantifier les impacts amenant jusqu'à un produit fini soit une puce dans son packaging. L'étude s'étend donc de la conception et simulation électrique, à la fabrication par un fondeur, à la découpe et à la mise en boîtier, au test industriel jusqu'à la livraison au client final.

## References:

*Using a data driven approach for comprehensive Life Cycle Assessment and effective eco design of the Internet of Things: taking*

*LoRa-based IoT systems as examples Ernesto Quisbert-Trujillo Panagiota Morfouli Nov. 2023"*



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

WEPPE Olivier - Univ. Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR - UMR 6164, France

RUMLEY Sébastien - Haute École spécialisée de Suisse occidentale, Suisse

## 39. IMPACT D'UNE TAXE CARBONE SUR LE COUT TOTAL DU CYCLE DE VIE DE SERVEURS

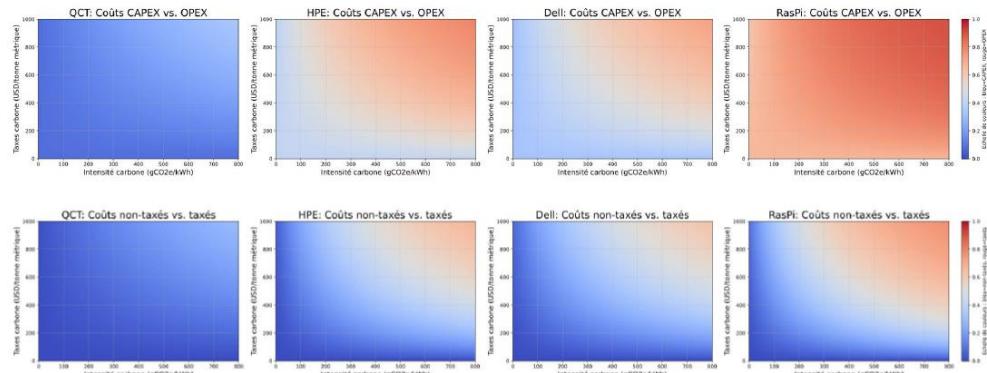
Nous analysons le coût total du cycle de vie (TCO) de quatre serveurs très différents en y intégrant une taxe carbone, et nous ramenons ensuite ce TCO à un nombre de requêtes traitées durant la vie du serveur pour obtenir un coût total par requête (CTpR). Nous montrons qu'une taxe carbone affecte marginalement le CTpR résultant de l'utilisation de machines puissantes et récentes, alors qu'elles peuvent constituer plus de la moitié des coûts pour des équipements "frugaux" plus anciens ou à faible capacité ; malgré cela, en termes de CTR absolus, nos mesures et analyses montrent que des machines "frugales" sont plus avantageuses que des serveurs à plus haute capacité.

Dans des travaux précédents [1, 2], nous avons mesuré la consommation énergétique de 4 serveurs alors qu'ils traitaient un flux d'identiques requêtes : une machine QCT produite en 2024 basée sur la puce GH200 de Nvidia; deux serveurs « traditionnels » vendus par Dell et HPE, datant de 2015 et équipés de CPUs comparables à 16 cœurs ; une Raspberry Pi 4 Model B datant de 2021.

Dans cette contribution, nous analysons le coût total par requête, en faisant l'hypothèse que tous les serveurs fonctionnent à leur pleine capacité et sont amortis sur 10 ans.

La Figure 1 montre la répartition des coûts totaux, décomposés selon différentes composantes, pour mettre en évidence leur poids relatif. L'impact de la taxe carbone reste marginal pour la machine puissante et récente, peu importe le montant de la taxe et l'intensité carbone. La situation est plus nuancée pour les machines plus vieilles ou à capacité moindre : dans ce cas, la taxe peut dominer les coûts.

**Figure 1 :** Distribution des coûts d'exploitation de 4 serveurs, à taux d'occupation maximal, amortis sur 10 ans, tarif de 0.16 USD/kWh

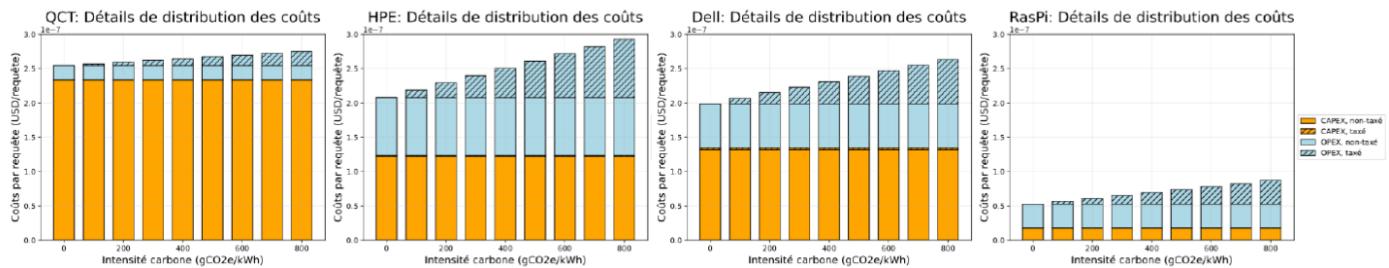


Les Figures 2 et 3 montrent deux scénarios spécifiques : dans ces deux cas, l'énergie taxée représente une partie non-négligeable des coûts pour toutes les machines hors QCT. Les coûts absolus des requêtes faites à ces machines sont toutefois plus faibles. Le Raspberry Pi propose le meilleur CTpR, mais aussi l'impact carbone le plus faible par requête.

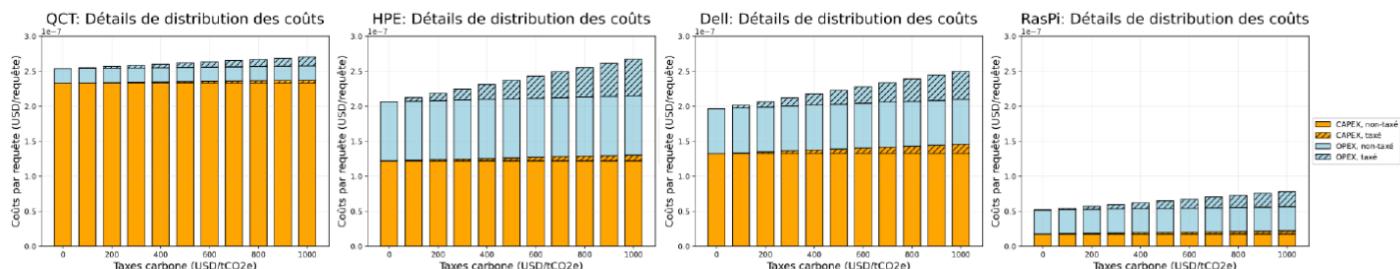
# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

**Figure 2 :** Détails des coûts présentés en Figure 1, calculés avec une taxe carbone fixe de 200 USD/tCO<sub>2</sub>eq



**Figure 3 :** Détails des coûts présentés en Figure 1, calculés avec une intensité carbone fixe de 100 gCO<sub>2</sub>eq/kWh



## Références

- [1] Loïc Guibert, Sébastien Reynaud, Olivier Weppe, Kristjon Ciko, Michael Welzl, and Sébastien Rumley. TRAFFIC: Testbed foR Assessing energy eFFiciency In throughput Computing. In CF '25 Companion: Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Computing Frontiers: Workshops and Special Sessions, 99–107, 2025.
- [2] Olivier Weppe, David Bekri, Thibaut Marty, Loïc Guibert, Louise Aubet, Jean-Christophe Prévotet, Maxime Pelcat, and Sébastien Rumley. Carbon Topography Representation: Improving Impacts of Data center Lifecycle. In ACM SIGEnergy Energy Informatics Review, vol. 5, no. 2, pp. 41–47, 2025.
- [3] Norman P. Jouppi, Doe Hyun Yoon, Matthew Ashcraft, Mark Gottscho, Thomas B. Jablin, George Kurian, James Laudon, Sheng Li, Peter Ma, Xiaoyu Ma, Thomas Norrie, Nishant Patil, Sushma Prasad, Cliff Young, Zongwei Zhou, and David Patterson. Ten lessons from three generations shaped google's tpuv4i : Industrial product. In 2021 ACM/IEEE 48th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), pages 1–14, 2021.
- [4] Luiz André Barroso, Urs Hözle, and Parthasarathy Ranganathan. The datacenter as a computer: Designing warehouse-scale machines. Springer Nature, 2019.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

LAMARD Gabin – CEA-Leti

WARSONO Api – CEA-Leti

## 40. ANALYSE DE CYCLE DE VIE DU PROCEDE DE LITHOGRAPHIE PAR NANOIMPRESSION.

L'impact environnemental du procédé de lithographie par nano impression (NIL) au Leti a été évalué à l'aide d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV). Les résultats indiquent que la réutilisation ou le recyclage des masters et des moules permettent de réduire significativement l'empreinte écologique de ce procédé. Le NIL se révèle donc être l'un des procédés de lithographie les moins impactant pour l'environnement.

"L'impact environnemental du procédé de lithographie par nano impression (NIL) en 200mm au Leti a été évalué à l'aide d'une Analyse de Cycle de Vie afin de déterminer si l'absence d'étape de développement apporte un réel gain environnemental par rapport à une lithographie optique 248nm et E-Beam.

L'étude révèle que l'impact environnemental du NIL est réparti sur les catégories suivantes: l'utilisation des ressources fossiles et minérales, le changement climatique et la formation d'ozone photochimique. En effet, 75% des 1,31kgCO<sub>2</sub>eq émis au cours du procédé sont dus à l'étalement de la résine photosensible. En réutilisant les masters et moules souples, les émissions liées à leur fabrication sont atténues. Ainsi, une étape NIL a un score unique [1] 8,9 fois inférieur à la lithographie optique 248 nm et 36 fois inférieur à une lithographie E-Beam. Toutefois, cet écart se réduit à un facteur 2 à 3 en intégrant la gravure au procédé.

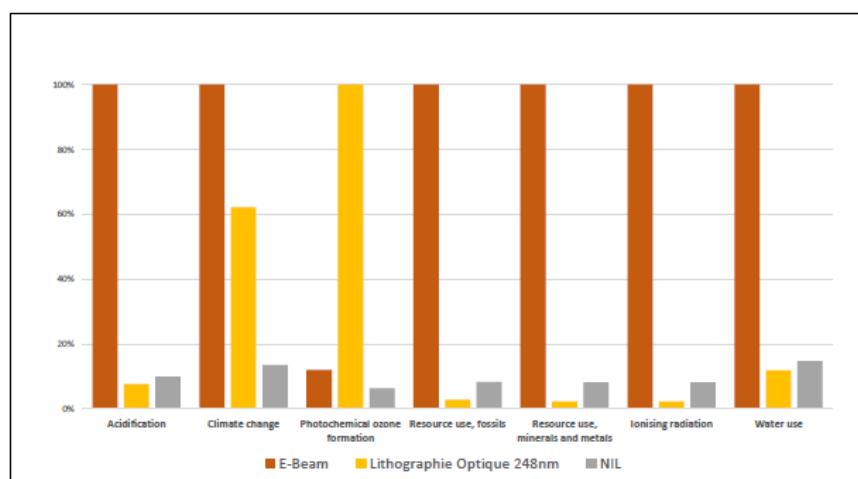


Figure 1 : Comparaison des lithographies E-Beam, Optique et NIL sur les catégories d'impacts contribuant à 90% de leurs scores uniques [PEF]

[1] European Platform on LCA : "Product Environmental Footprint Category 2 Rules Guidance", [https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEFCR\\_guidance\\_v6.3-2.pdf](https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEFCR_guidance_v6.3-2.pdf) (2018)



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

BARANGE Nathalie - Trixell

## 41. SAV ET DURABILITE : UNE APPROCHE LEAN CREATRICE DE VALEUR POUR LE CLIENT, L'ENTREPRISE ET LA PLANETE

"La stratégie du service après-vente de nos produits, des capteurs numériques pour les systèmes de radiologie, repose sur les 3P (People, Planet, Profit) : augmenter la valeur pour le client tout en assurant la rentabilité pour l'entreprise et en réduisant l'impact environnemental.

L'analyse de chaque retour terrain et des problèmes que nos produits posent à nos clients, alimente un cercle vertueux d'innovation, de durabilité et de performance économique."

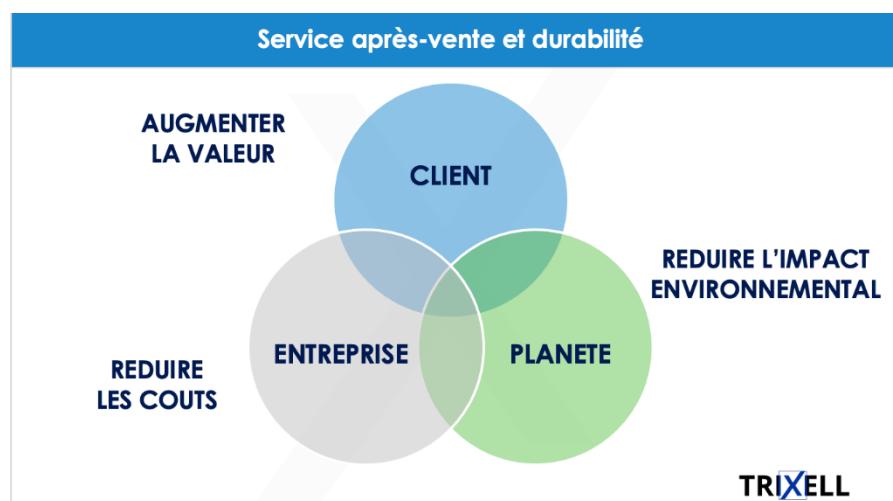
"La stratégie SAV de nos produits, les capteurs numériques pour les systèmes de radiologie, est triple : apporter de la valeur au client, assurer la rentabilité pour l'entreprise et minimiser l'impact environnemental — une approche fondée sur les principes du Lean engineering.

L'analyse systématique de chaque retour client et la compréhension de la cause racine du problème nous permettent d'améliorer la fiabilité de nos produits actuels, de mieux comprendre les cas d'usage de nos clients utilisateurs, et les changements à intégrer dans la conception des futurs produits.

Pour inciter les clients à nous retourner nos produits, le prix de réparation doit être fixé par le marché. Si nous voulons faire de la marge, nous devons donc travailler sur notre Target Cost, en décomposant les coûts de main d'œuvre et de matière, et en discutant des options possibles avec les concepteurs pour améliorer la démontabilité du produit et le réemploi de pièces. Ces apprentissages permettent d'améliorer la réparabilité des futurs produits dès la phase de conception.

En parallèle, un flux de pièces reconditionnées, alimenté par la récupération de capteurs en fin d'usage auprès des clients, permet de réduire les coûts SAV tout en limitant les déchets électroniques.

Cette démarche Lean et circulaire relie la satisfaction client, la maîtrise économique et la responsabilité environnementale, faisant du SAV un véritable levier de durabilité et de compétitivité."



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

CAROFF Tristan, CEA-LETI

ANNE Margaux, Insa Strasbourg

BRULAIS Sébastien, CEA-LETI

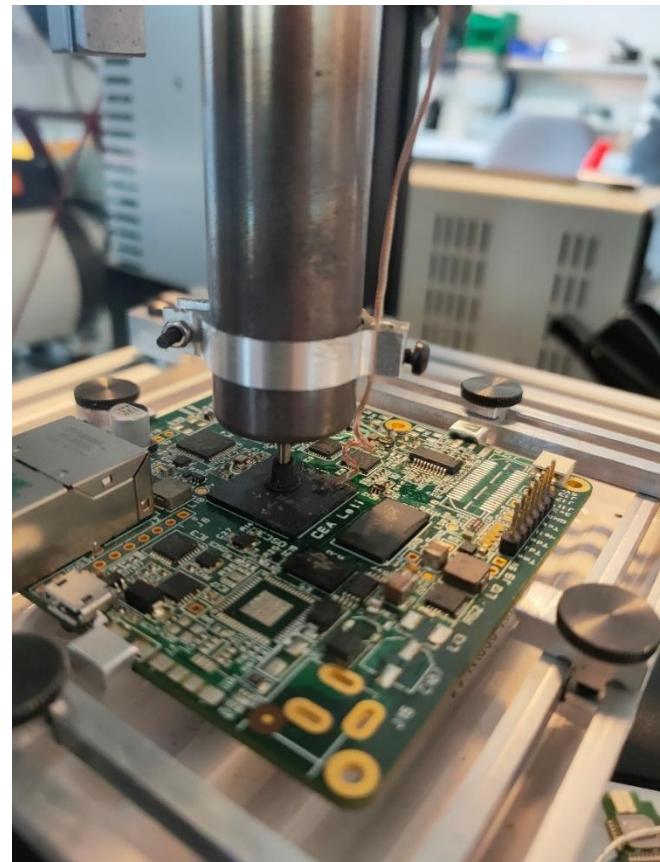
ELHORGA Vincent, CEA-LETI

BOISSEAU Sébastien, CEA-LETI

## 42. E-WASTE DISASSEMBLY SYSTEM FOR COMPONENT RECOVERY AND REUSE

In response to the growing challenge of electronic waste, we developed an open-source pick-and-remove system for recovering electronic components for reuse. Preliminary tests demonstrated high recovery rates and minimal environmental impact of the proposed system, fostering a circular electronics economy.

In response to the growing challenge of electronic waste, we developed an open-source pick-and-remove system for recovering electronic components (ECs) for reuse. This platform is based on a repurposed 3-D printer chassis, an infrared pre-heater, and a hot-air soldering station. Preliminary experiments on small batches of PCBs show recovery rates of 75–91 % for integrated circuits (ICs) and 100 % for tantalum capacitors, with all recovered parts passing functional tests and exhibiting no thermal damage. Each cycle lasts 1–1.5 min and consumes 0.0345 kWh, translating to 1.1 g CO<sub>2</sub> per pick-and-remove operation on the French grid. Compared with the cradle-to-gate carbon footprints of new ICs (35–50 kg CO<sub>2</sub> per wafer) and tantalum capacitors (97–312 kg CO<sub>2</sub> per kg), the recovery process requires between 0.4 to 52 % of the manufacturing emissions, depending on component size and energy mix. This work aims at supporting the transition to a circular electronics economy by making component recovery accessible and providing additional value to electronic waste, unlocking secondary markets. By releasing the mechanical drawings, firmware, and operation manual under a CERN-OHL license, we aim to enable academic laboratories and FabLabs to adopt and modify the system, fostering a circular electronics economy and enabling community-driven improvements. Future work will focus on the development of methods to estimate remaining useful life (RUL) for quality certification of recovered ECs.





# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

BLANCO Sylvie, MICHEL Hélène, Nguyen Loc GEM

## 43. EXPLORING SUSTAINABLE TECH IMAGINARIES THROUGH DESIGN FICTION: THE CASE OF DEVICE COMPANIONS

**how design fiction can act as both a lever and a limiter of sustainable imaginaries, through an experimental study on device companions related to smartphones.**

Conducted during the Sustainable Electronics Summer School (GreenChip European Project) in partnership with BeeAlp, the workshop engaged 29 participants—PhD candidates and professionals from academia and industry—in a structured design fiction protocol. Using a facilitation kit combining science-fiction and technology cards, participants collaboratively envisioned everyday life in 2037 under three regulatory conditions for emerging technologies: mandatory, regulated, and banned. Data were collected through Speakpipe voice recordings, photographs, and ethnographic notes, then analyzed to construct a five-part typology of companions: functional assistants, empathic mediators, ethical guardians, attachment intensifiers, and resistant entities.

Findings highlight the ambivalence of design fiction as a research tool—capable of revealing ethical tensions and ecological blind spots, yet prone to reproducing techno-optimistic narratives if not reflexively framed. The paper outlines managerial implications for responsible innovation strategies, methodological insights for participatory foresight, and academic contributions to sustainability-oriented design research.

*Keywords*

*Design Fiction; Sustainable Electronics; Responsible Innovation; User-Technology Relationship; Socio-Technical Imaginaries; Futures Thinking*



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

LETERRIER Nicolas, Schneider Electric

BLANCO Sylvie, GEM

## 44. EARLY SIGNS OF A SUSTAINABLE SEMICONDUCTOR FUTURE

The semiconductor industry stands at the core of the digital transformation, enabling unprecedented technological progress while facing increasing criticism for its substantial carbon footprint. Numerous initiatives—both technological and regulatory—seek to mitigate the sector's environmental impact. However, the persistent tension between economic performance and sustainability objectives, particularly climate-related ones, slows the pace of transition.

This contribution aims to identify early signs of a strong sustainability orientation among semiconductor industry stakeholders—those most likely to drive structural change and accelerate the sector's contribution to climate transition. Focusing on the critical issue of energy consumption in facilities such as data centers and cleanrooms, the study examines initiatives undertaken by their main actors through an in-depth analysis. Building on this work, a typology of early indicators and illustrative examples of emerging transformative behaviors is proposed. This framework helps reveal major players' efforts along the value chain, how they are connected to form emerging sustainable ecosystems. It helps understand to what extent they align their technological innovations with environmental responsibilities and it enables sensemaking about the way different approaches may diffuse across networks, thus providing global sustainable leadership to their owners.

The typology can serve as a monitoring tool to track transformation trajectories, identify key agents of change, and finally, highlight the most relevant actions for advancing a truly sustainable and scalable digital infrastructure.

*Keywords:* semiconductor sustainability, systemic transformation, energy-intensive infrastructures, early indicators of change



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

CHABAUD Sandrine, Aledia

DUPONT Muriel, Aledia

## 45. ALLIER HAUTE TECHNOLOGIE ET RESPONSABILITE ENVIRONNEMENTALE : CONSTRUCTION DU SITE DE PRODUCTION D'ALEDIA A CHAMPAGNIER

La création du site de production d'Aledia à Champagnier incarne une nouvelle génération d'infrastructures industrielles, où l'innovation en semi-conducteurs s'allie à une démarche environnementale ambitieuse. Ce site achevé en 2024 illustre comment performance industrielle et durabilité peuvent converger.

Parmi les objectifs fixés pour 2026 : 18 % de recyclage des eaux de process et 10 % d'économies sur les équipements des salles blanches. Ces cibles sont soutenues par des initiatives concrètes en matière de recyclage et d'optimisation énergétique.

Le bâtiment tertiaire, certifié BREEAM "Very Good", affiche une performance énergétique supérieure de 15 à 25 % aux standards réglementaires, grâce à l'intégration d'énergies renouvelables et à un suivi rigoureux des consommations.

Dans le cadre de la construction du bâtiment et des installations techniques, des choix structurants ont été faits pour réduire la consommation énergétique. Un groupe de travail dédié est en place afin d'analyser toutes les pistes d'optimisation lors du démarrage des nouvelles installations. Des compteurs spécifiques ont été installés pour permettre un mesurage fin, identifier les postes les plus consommateurs et agir efficacement sur les bons leviers.

Ce retour d'expérience met en lumière les leviers d'action pour une industrie plus responsable, et ouvre la voie à une durabilité stable et reproductible dans le secteur des semi-conducteurs.



# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble

Organisé par



Avec le soutien de



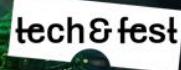
Deuxième édition

# Symposium pour l'électronique & le numérique durables

Le 16 décembre 2025, Grenoble



En partenariat avec



Avec la participation de



Auvergne-Rhône-Alpes



FRENCH INSTITUTES OF TECHNOLOGY

