

Gabin GUILLEMAUD - Laura VAUCHE  
João-Carlos LOPES BARBOSA - Véronique SOUSA  
Léa DI CIOCCIO

Édité le  
13/09/2024

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

CEA-Leti, Univ. Grenoble Alpes, F- 38000 Grenoble, France

Cette ressource fait partie du N° 113 de La Revue 3EI du 3<sup>ème</sup> trimestre 2024.

Le contenu est issu d'une publication à la conférence SGE 2023, 5-7 juillet 2023, Lille.

## 1 - Résumé

Les composants de puissance à base de semiconducteurs à large bande interdite "Wide Band Gap (WBG)" sont intéressants pour augmenter l'efficacité énergétique des convertisseurs de puissance, par rapport aux composants conventionnels à base de silicium (Si). Alors que le potentiel gain en efficacité énergétique est connu, le coût énergétique et les autres impacts environnementaux à la fabrication restent peu documentés. En effet, à notre connaissance, il n'y a pas ou peu de données d'analyse de cycle de vie (ACV) disponibles pour les composants de puissance à base de nitrure de gallium (GaN ou GaN/Si) et carbure de silicium (SiC).

Dans cet article, nous présentons une analyse de cycle de vie du berceau à la porte pour un composant de puissance GaN/Si, permettant d'identifier les postes les plus impactants et de proposer des pistes d'éco-conception.

## 2 - Introduction

Les composants de puissance à base de semiconducteurs à large bande interdite semblent prometteurs par rapport au Si pour économiser l'énergie durant les phases d'usage dans de nombreuses applications telles que les onduleurs pour le photovoltaïque, l'alimentation des téléphones et PC portables, les alimentations sans interruption pour les data centers, ainsi que la motorisation et l'infrastructure de chargement pour les véhicules électriques [1], [2] ainsi que pour réaliser des convertisseurs d'énergie pour de nouvelles applications. Cependant les impacts environnementaux sur toute la phase du cycle de vie (au-delà de la phase d'usage) restent peu connus. En particulier, la fabrication de composants à base de semiconducteurs nécessite de nombreuses étapes, avec une consommation importante d'énergie, de produits chimiques et de matériaux. Dans cet article, nous évaluons les impacts environnementaux à la fabrication d'une technologie de transistors GaN/Si, de spécifications 650V 30A [3], pour une plaque de 200mm de diamètre et pour un transistor de puissance (Fig. 1a et 1b), au moyen de la méthodologie analyse de cycle de vie (ACV).

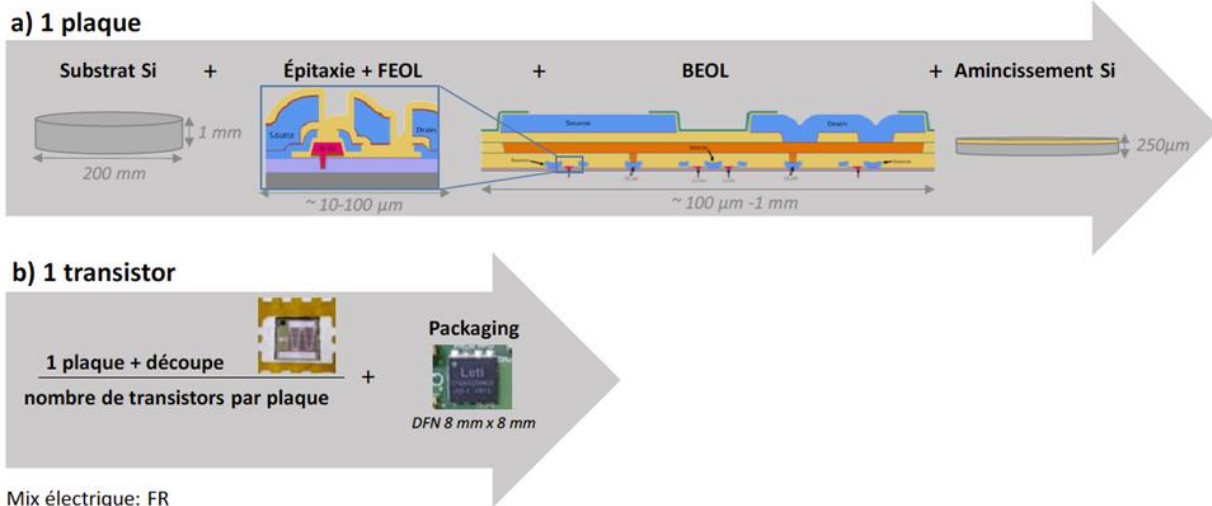


Figure 1 : Évaluation des impacts pour 2 périmètres étudiés :  
a) une plaque de 200 mm de diamètre et b) un transistor.

### 3 - Inventaire sur cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie est réalisé en se basant sur la fabrication au CEA-Leti, dans des salles blanches micro-électroniques de R&D, compatibles avec une ligne de production CMOS. Dans cette étude, le procédé de fabrication R&D requiert 17 niveaux de photolithographie : 10 pour le FEOL (Front End Of Line correspondant aux parties actives du transistor), 6 pour le BEOL (Back End Of Line correspondant aux connexions métalliques), et 1 pour l'amincissement du substrat. On comptabilise les entrants et les sortants depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fabrication des composants. Il s'agit alors d'une ACV du berceau à la porte. La fabrication de plaques de semiconducteurs requiert de nombreuses étapes, pour lesquelles on répertorie la consommation en produits chimiques, gaz, métaux, eau. D'autre part, le fonctionnement de l'infrastructure salle blanche nécessite une consommation importante en électricité, gaz naturel, eau adoucie et eau de refroidissement pour maintenir une atmosphère contrôlée. Le fonctionnement des équipements requiert également un raccordement aux réseaux d'eau ultra pure, de vide, et d'alimentation de différents gaz comme l'azote et l'oxygène. Des méthodologies spécifiques sont utilisées afin d'allouer ces consommations et les émissions aux différents procédés [4]-[6]. La consommation de plaques de silicium pour la qualification et le suivi des procédés ainsi qu'en tant que support mécanique pour le collage ; la fabrication des équipements ne sont pas prises en compte.

Pour une plaque de 200mm, après fabrication des transistors et amincissement du substrat Si (Fig. 1a), on calcule que la quantité de matière qui a été utilisée lors de la fabrication est 6 à 69 fois plus importante que la quantité de matière présente sur la plaque, comme reporté dans le Tableau 1.

Élément	Quantité présente sur la plaque (g)	Quantité utilisée pour la fabrication (g)	Facteur
Si	12.066	77.650	6
Ga	0.411	2.860	7
Al	0.277	4.057	15
Ni	0.098	1.047	11
Cu	0.793	27.534	35
Au	0.061	0.591	10
Ti	0.053	3.671	69
W	0.022	0.573	26

Tableau 1 : Inventaire du cycle de vie (ICV). Quantité de matière présente sur la plaque de 200mm après amincissement, comparaison avec les quantités de matière utilisées pendant la fabrication, par consommation de cibles métalliques pour les dépôts physiques par phase vapeur (PVD), et de précurseurs pour l'épitaxie et les dépôts ALD, CVD, ECD, LPCVD et PECVD.

Pour le cuivre, titane et tungstène, une quantité importante de matière a été utilisée par rapport à la quantité présente sur la plaque car une part importante des couches déposées a été retirée par CMP.

Environ 700kWh d'électricité, 15m<sup>3</sup> d'eau de refroidissement, 0.6m<sup>3</sup> d'eau dé-ionisée et 61kg de produits chimiques ont été utilisés pour la production d'une plaque (Fig. 1a). Les principaux produits chimiques sont l'azote, des acides tels que l'acide nitrique, l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique, de l'eau oxygénée, des chimies de polissage, de l'isopropanol. Ces quantités sont plus élevées que les 329kWh, 3.1 m<sup>3</sup> d'eau et 3.6kg de produits chimiques reportés par plaque en industrie en 2011[4].

L'évaluation des impacts est réalisée en utilisant le logiciel SimaPro et la base de données ecoinvent v3.8, en suivant la méthode EF3.0 recommandée par la Commission Européenne. 16 catégories d'impacts environnementaux sont évaluées. Lorsque les données n'étaient pas disponibles dans la base de données (par exemple des précurseurs organométalliques tels que le TMGa, des résines, des chimies), elles ont été modélisées en se basant sur des méthodologies décrites dans la littérature [7], [8] ou remplacées par des données génériques présentes dans la base de données ecoinvent. Les impacts environnementaux pour la production d'une plaque (Fig. 1a), dans des salles blanches micro-électroniques de R&D sont ainsi évalués. Les 4 catégories d'impacts environnementaux prépondérantes sont l'épuisement des ressources minérales et métalliques (0.0406 kg Sb éq), l'épuisement des ressources fossiles (11820 MJ), le changement climatique (434 kg CO<sub>2</sub> éq) et l'écotoxicité en eaux douces (1.66 x10<sup>4</sup> CTUe), contribuant à 80% du score environnemental unique (102 mPt). La répartition des contributions à ces 4 indicateurs est décrite en Figure 2.

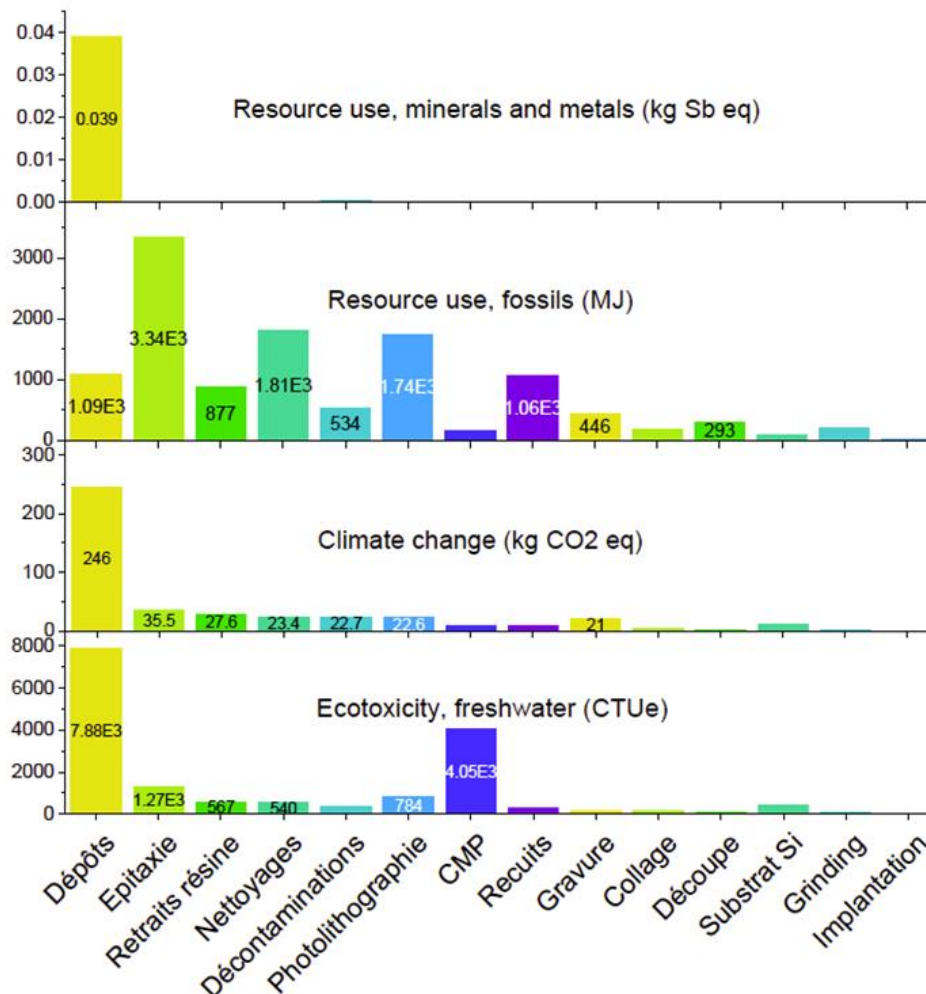


Figure 2 : Contributions des différents ateliers pour une plaque. Les contributions de fonctionnement de l'infrastructure salle blanche sont incluses dans les procédés. - R&D

Une partie importante de ces impacts est liée à une seule étape, un dépôt physique en phase vapeur (PVD) d'or en face arrière. En effet, la consommation de 0.591g d'or (donnée ecoinvent "Gold {GLO}| market for | Cut-off, U") contribue pour 95% de l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques avec 0.0384 kg Sb eq. Cette donnée est également prépondérante (46% des impacts) sur l'indicateur écotoxicité en eaux douces avec  $7.48 \times 10^3$  CTUe, à cause des résidus sulfurés liés à l'extraction minière de l'or. L'or fait partie des métaux ayant les impacts environnementaux les plus élevés (par kg) [9]. Pour la production d'une plaque, l'or ne représente que 3% des impacts sur l'épuisement des ressources fossiles avec 375MJ et 6% des impacts sur le changement climatique avec 28.9 kg CO<sub>2</sub> eq. Il est à noter que seulement 61mg d'or ont été déposés sur la plaque et que la consommation de 591 mg a été estimée sur la base de données internes et non mesurée directement. D'autre part, une partie de l'or consommée et non déposée sur la plaque est en fait récupérée, affinée et réutilisée, ce qui permettrait de réduire les impacts, mais n'a pas été pris en compte dans l'ACV par manque de données.

L'étape d'épithaxie ressort comme très impactante sur l'épuisement des ressources fossiles (Fig. 2) de par sa consommation d'électricité directement pour le procédé, et pour le fonctionnement de l'infrastructure salle blanche pendant plusieurs heures. Le substrat Si contribue peu, avec seulement 98 MJ.

Les émissions de gaz fluorés (notamment C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>, NF<sub>3</sub>, CHF<sub>3</sub>) pendant les étapes de nettoyage de la chambre de PECVD ressortent comme très impactantes sur le changement climatique (jusqu'à

58kg CO<sub>2</sub> eq pour une seule étape), de par l'absence de système d'abattement sur un des équipements utilisés. Les équipements de gravure avec consommation de chimies fluorées et chlorées sont munis de systèmes d'abattement efficaces et donc ne contribuent pas significativement au changement climatique par rapport aux autres étapes dans cette étude.

La potasse (KOH) utilisée dans les chimies de polissage (CMP) contribue significativement à l'écotoxicité en eau douce (3.68 x10<sup>3</sup> CTUe). La composition des chimies propriétaires a été soit modélisée à partir de fiches de sécurité, publications et brevets, soit modélisée avec des données génériques présentes dans la base de données ecoinvent. Ici, une des chimies de polissage a été modélisée avec la donnée générique « Silica Slurry {GLO}| market for | Cut-off, U » contenant du KOH. Ces résultats montrent l'importance de données fiables dans les bases de données et d'avoir accès aux informations détaillées sur la composition des chimies utilisées.

Une autre manière de représenter ces résultats est de séparer les contributions liées aux consommations de l'infrastructure salle blanche des procédés.

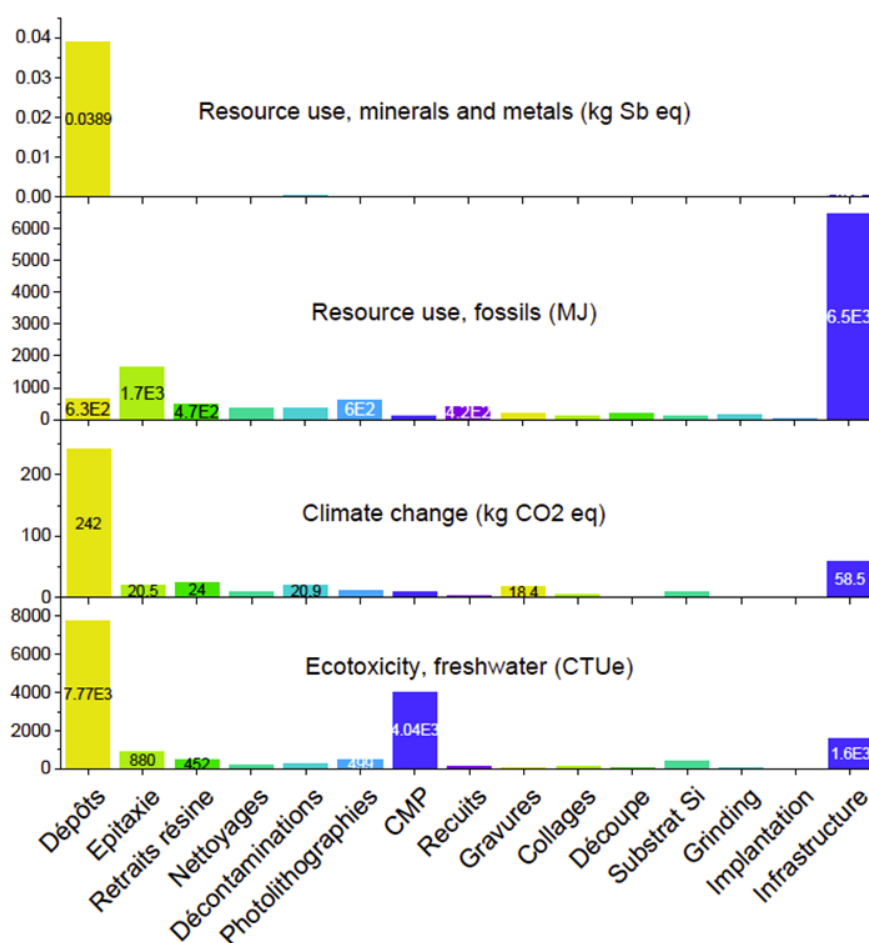


Figure 3 : Contributions des différents ateliers pour une plaque. Les contributions de fonctionnement de l'infrastructure salle blanche sont affichées séparément. - R&D

La Figure 3 nous montre que les impacts proviennent majoritairement des procédés pour les indicateurs épuisement des ressources minérales et fossiles, changement climatique et écotoxicité. L'impact de l'infrastructure salle blanche est prépondérant pour l'épuisement des ressources fossiles, à cause de la consommation d'électricité et de gaz naturel.

Avec un scénario plus « industriel » ou « optimisé » (avec un système d'abattement des gaz fluorés pour les dépôts, sans les décontaminations liées aux contraintes du centre de R&D, remplacement de l'or en face arrière par de l'argent), les 6 catégories prépondérantes sont

l'épuisement des ressources fossiles (11093 MJ), les radiations ionisantes (453 kBq U-235 eq), le changement climatique (195 kg CO<sub>2</sub> eq), l'écotoxicité en eaux douces (8890 CTUe), l'eutrophisation de l'eau douce (0.217 kg P eq) et l'épuisement des ressources minérales et métalliques (0.00238 kg Sb eq), contribuant à 84% du score environnemental unique (42 mPt). La répartition des contributions à ces 6 indicateurs est décrite en Figure 4.

L'identification des postes les plus impactants permet de proposer des pistes d'éco-conception sur lesquelles travailler en priorité pour réduire les impacts, que ce soit au niveau intégration (choix des métaux, nombre d'étapes), procédés (choix des chimies, diminution des consommations, recettes de nettoyage) et infrastructure (installation d'un système de traitement des rejets atmosphériques, amélioration de la performance énergétique).

Pour l'instant, le packaging pour les composants GaN est souvent effectué avec les mêmes boîtiers que pour les composants Si, bien que des packagings plus adaptés (notamment en termes de dissipation thermique) existent. Dans cette étude, on considère qu'après découpe de la plaque, les différentes puces sont mises en boîtier DFN et connectées avec des fils de bonding en or (Fig. 1b). La quantité de matière présente dans un boîtier de 8x8mm<sup>2</sup> (sans la puce) est décrite dans le Tableau 2.

Élément	Quantité présente dans le packaging (mg)
Cu	37.4
Ni	0.03
Au	12.1
Polymère epoxy	103

Tableau 2 : Inventaire de cycle de vie (ICV). Quantité de matière présente dans le packaging

Pour un transistor de spécifications 650V 30A, on estime qu'on peut extraire environ 2000 puces d'une plaque de 200mm de diamètre, mais ce chiffre peut varier en fonction des performances électriques telles que le R<sub>ON</sub>, et les rendements de production. Pour un boîtier (sans la puce, sans l'inventaire complet des procédés de fabrication, uniquement pour les matériaux listés dans le Tableau 2), la catégorie prépondérante d'impact est l'épuisement des ressources minérales et métalliques (kg Sb eq), contribuant à 85% du score environnemental unique (1.09 mPt), principalement de par l'utilisation de fils d'or. Comme les fils d'or sont très impactants, il a déjà été suggéré de les remplacer par des fils en Cu, permettant une réduction significative des impacts environnementaux [10]. Bien que le back-end n'ait pas été pris en compte dans des études précédentes de par une contribution plus faible à l'indicateur énergie grise (énergie consommée pour fabriquer les produits), l'impact élevé de l'or montre qu'il est nécessaire d'inclure le back-end dans l'analyse des impacts environnementaux [2].

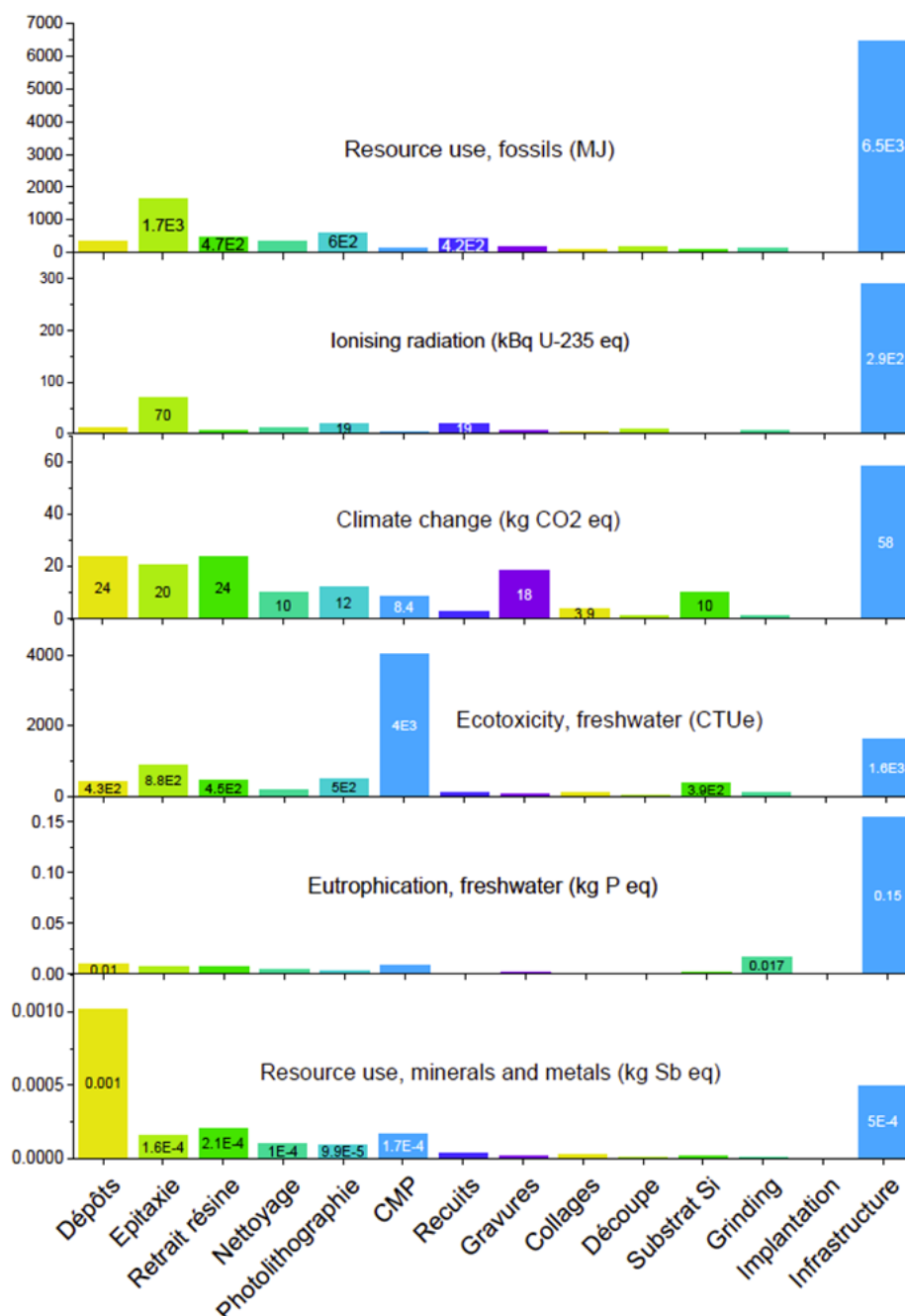


Figure 4 : Contributions des différents ateliers pour une plaque. Les contributions de fonctionnement de l'infrastructure salle blanche sont affichées séparément. - scénario « industriel » (avec un système d'abattement des gaz fluorés pour les dépôts, sans les décontaminations liées aux contraintes du centre de R&D, remplacement de l'or en face arrière par de l'argent)

## 4 - Conclusion

En résumé, dans cette publication l'empreinte carbone à la fabrication d'un transistor GaN/Si 650V 30A est estimé entre 0.12 à 0.81 kg CO<sub>2</sub> eq suivant les options retenues. On considère 0.12 à 0.22 kg CO<sub>2</sub> eq par puce, suivant le scénario (« industriel » ou R&D), pour une hypothèse de production de 2000 composants par plaque, plus 0.004 à 0.59 kg CO<sub>2</sub> eq par boîtier DFN (suivant le métal utilisé pour les fils de bonding). Ces chiffres pour la fabrication de composants sont comparés à ceux communiqués dans la littérature, les bases de données, et dans les communications des fabricants de produits microélectroniques dans le Tableau 3.

Composant	kg CO <sub>2</sub> eq
GaN/Si (puce seule) Boîtier DFN	0.12 à 0.22
GaN/Si (puce + boîtier DFN, ~0.24g) - cette étude	0.004 à 0.59 <b>0.12 à 0.81</b>
GaNFast power IC 2020 - Navitas Semiconductor [11]	0.18
Wafer production, fabricated, for IC, 1.35g - ecoinvent*	0.015
Si FET 2020 - Navitas Semiconductor [11]	0.66
Si P2PAK, 1.35g - CODDE, France	1.13
Si P2PAK, 1.35g - CODDE, Chine	2.37
Si TRIAC - ST Microelectronics [13]	7.8
Si IGBT (puce 1.26g, modélisée par Si + électricité), Chine [14]	16.7
SiC MOSFET - ST Microelectronics [15]	<0.206

Tableau 3 : Comparaison de l’empreinte carbone (kg CO<sub>2</sub> eq) à la fabrication du transistor GaN/Si de cette étude avec d’autres composants de puissance. \*Cette donnée est utilisée pour l’inventaire de cycle de vie d’un IGBT par Nordelöf et al.[12].

On remarque que les valeurs peuvent varier fortement d’une étude à l’autre, rendant la comparaison difficile. En effet, la dimension (épaisseur, surface) et le poids des composants peuvent varier suivant les spécifications électriques, le type de packaging, et les applications, et ne sont pas toujours mentionnés. Le périmètre de l’étude tel que le mix électrique du pays dans lequel est fabriqué le composant peut aussi impacter significativement les résultats (x2 pour le P2PAK entre France et Chine). Sans ces informations, il n’est pas possible de comparer les composants entre eux. A noter également que le changement climatique n’est pas le seul impact environnemental prépondérant et qu’il serait intéressant de pouvoir comparer les impacts sur plusieurs indicateurs communs (par exemple par une méthodologie multicritère comme l’ACV), afin de s’assurer qu’il n’y ait pas de transfert d’impacts.

Dans le domaine de l’électronique de puissance, contrairement au numérique, comme la consommation énergétique est plus importante pendant la phase d’usage que pendant la fabrication [2], [13], [15], [16], il sera important de prendre en compte la totalité du cycle de vie (extraction des matières premières, fabrication, usage, transport, fin de vie). Finalement, il faudra également considérer le convertisseur complet pour une application donnée (intensité d’usage, durée de vie) afin de pouvoir conclure sur les potentiels bénéfiques environnementaux par rapport aux composants classiques à base de Si et aux composants à base de SiC.

*Les auteurs et autrices remercient le réseau des Carnot pour le financement du projet ainsi que les équipes du LAPS et éco-innovation pour leurs contributions.*

## 5 - Références bibliographiques

- [1] M. Makoschitz, K. Krischan, P. Bergmann, A. Díaz, and R. Brueniger, “Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map,” IEA Technology Collaboration Programme on Energy Efficient End-Use Equipment (4E) - Power Electronic Conversion Technology Annex (PECTA), May 2020.

- [2] J. A. Warren *et al.*, “Energy Impacts of Wide Band Gap Semiconductors in U.S. Light-Duty Electric Vehicle Fleet,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 17, pp. 10294-10302, Sep. 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b01627.
- [3] C. Le Royer *et al.*, “Normally-OFF 650V GaN-on-Si MOSc- HEMT Transistor: Benefits of the Fully Recessed Gate Architecture,” in *2022 IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, 2022, p. 3.
- [4] A. Villard, “Développement de méthodologies d’Eco- conception pour le secteur microélectronique,” PhD thesis, Université de Grenoble, 2012.
- [5] J. C. Lopes Barbosa, V. Enyedi, L. Di Cioccio, P. Zwolinski, and C. LARGERON, “Développement d’une méthodologie de collecte de données pour l’Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans l’environnement de la recherche,” presented at the AXELERA, Oct. 13, 2022.
- [6] Laurie Beu and Sebastien Raoux, “Chapter 6: Electronics Industry Emissions,” in *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, vol. Volume 3: Industrial Processes and Product Use, .
- [7] S. B. Boyd, *Life-Cycle Assessment of Semiconductors*. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [8] E. Huber, V. Bach, P. Holzapfel, D. Blizniukova, and M. Finkbeiner, “An Approach to Determine Missing Life Cycle Inventory Data for Chemicals (RREM),” *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3161, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14063161.
- [9] P. Nuss and M. J. Eckelman, “Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis,” *PLoS ONE*, vol. 9, no. 7, p. e101298, Jul. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0101298.
- [10] C.-H. Kuo, A. H. Hu, L. H. Hung, K.-T. Yang, and C.-H. Wu, “Life cycle impact assessment of semiconductor packaging technologies with emphasis on ball grid array,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 276, p. 124301, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124301.
- [11] A. Schiro and L. Vaughan-Edmunds, “GaN ICs Drive Sustainability and Deliver CarbonNeutral Status,” *Power Electronics News*, Oct. 17, 2022.
- [12] A. Nordelöf and M. Alatalo, “A Scalable Life Cycle Inventory of an Automotive Power Electronic Inverter Unit,” CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Gothenburg, Sweden, Technical and Methodological Description, version 1.01 2016:5 (1.01), 2018.
- [13] “Footprint of a TRIAC Power Switch,” *ST - About ST - Sustainability - Sustainable Priorities - Sustainable Technology - Product development*. [https://www.st.com/content/st\\_com/en/about/st\\_approach\\_to\\_sustainability/sustainability-priorities/sustainable-technology/eco-design/footprint-of-a-triac-power-switch.html](https://www.st.com/content/st_com/en/about/st_approach_to_sustainability/sustainability-priorities/sustainable-technology/eco-design/footprint-of-a-triac-power-switch.html) (accessed Aug. 24, 2022).
- [14] J. Li, C. Wang, and B. Zhang, “Life Cycle Assessment of Typical Electric Vehicle IGBT Module,” *MSF*, vol. 847, pp. 398-402, Mar. 2016, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.847.398.
- [15] “Footprint of a SiC MOSFET.” [https://www.st.com/content/st\\_com/en/about/st\\_approach\\_to\\_sustainability/sustainability-priorities/sustainable-technology/eco-design/footprint-of-a-sic-mosfet.html](https://www.st.com/content/st_com/en/about/st_approach_to_sustainability/sustainability-priorities/sustainable-technology/eco-design/footprint-of-a-sic-mosfet.html) (accessed May 04, 2023)
- [16] A. Díaz Triana, S. Schmidt, S. Glaser, and M. Makoschitz, “A ‘life cycle thinking’ approach to assess differences in the energy use of SiC- vs. Si power semiconductors,” in *e.nova 2021 Conference “Green Deal, Energy - Building - Environment”*, 2022, p. 10.