

Les défis technologiques et humains de la microélectronique et des nanotechnologies

O. Bonnaud^{a,b}

^a IETR, Université de Rennes, Rennes, France
GIP-CNFM, Grenoble, France

Contact email : olivier.bonnaud@univ-rennes.fr

Le développement des technologies numériques associées à internet dans le monde a été fulgurant depuis le début des années 2000 avec une croissance exponentielle. Il en est de même pour la quantité de données transférées et traitées et pour la consommation d'énergie électrique. Si cette tendance ne se ralentit pas, d'ici 2030, la totalité de la production mondiale d'énergie électrique sera consacrée aux activités numériques. Tous les équipements numériques sont basés sur des composants, circuits et systèmes microélectroniques. Le défi actuel consiste à diviser par 100 la consommation d'électricité des équipements électroniques. De nombreuses solutions récentes issues d'activités de recherche impliquant de nouvelles architectures, technologies, matériaux et concepts sont disponibles. Mais la mise en œuvre de ces approches nécessite de nouvelles compétences directement liées aux besoins des entreprises de la microélectronique. Une politique d'acquisition de nouvelles compétences dans le domaine est actuellement développée dans le cadre du réseau national français d'enseignement supérieur en microélectronique. L'objectif final est de former plus de trente mille ingénieurs, docteurs et techniciens dans les six prochaines années dans le cadre du programme France 2030.

I. Introduction

Le développement des technologies numériques dans le monde a été fulgurant depuis le début des années 2000. Le nombre d'objets connectés, de liens internet et d'autres systèmes numériques a augmenté de manière exponentielle en accord avec la loi de Moore (1) et au-delà de Moore (2), entraînant une augmentation exponentielle de la quantité de données transférées et traitées (3-4) ainsi que de la consommation d'énergie électrique (5-6). Si cette tendance ne se ralentit pas, ce qui semble peu probable, d'ici 2030, la totalité de la production mondiale d'énergie électrique sera consacrée aux activités numériques (5-6). Tous les équipements numériques sont basés sur des composants, circuits et systèmes microélectroniques (7). Le défi actuel est donc de se concentrer sur le domaine de la microélectronique et des nanotechnologies avec l'objectif à moyen terme de diviser par 100 la consommation d'électricité des équipements électroniques. De nombreuses solutions récentes issues d'activités de recherche impliquant de nouvelles architectures, technologies, matériaux et concepts sont disponibles (8-9). La mise en œuvre de ces approches nécessite de nouvelles compétences directement liées aux besoins des entreprises de la microélectronique, qui connaissent une pénurie d'emplois depuis plus de cinq ans. Une politique d'acquisition de nouvelles compétences dans le domaine est actuellement

développée dans le cadre du réseau national français d'enseignement supérieur en microélectronique (10-11). L'objectif final est de former plus de trente mille ingénieurs, docteurs et techniciens dans les six prochaines années dans le cadre du programme France 2030. L'objectif de cet article consiste à mettre en évidence les limitations actuelles et les défis. La suite porte sur les solutions potentielles sur le plan technique et la stratégie adoptées au niveau du réseau national de formation pour faire face à ces défis, seul moyen d'éviter une impasse prochaine avec des conséquences catastrophiques sur le plan sociétal au niveau mondial.

II. Objets connectés et limite du développement

L'internet et les objets connectés sont fondés sur des dispositifs électroniques comportant un grand nombre de fonctions qui permettent de partir d'un signal de capteur, de le transformer sous forme numérique et de le transmettre par différents protocoles de communication à une centre de données ou une station de contrôle à distance qui pilote le retour vers un actionneur. La figure 1 donne une vue schématique du principe d'un tel objet connecté. Les capteurs et les actionneurs peuvent être de toute nature (4), physique, optique, magnétique, mécanique, chimique, biologique, etc.

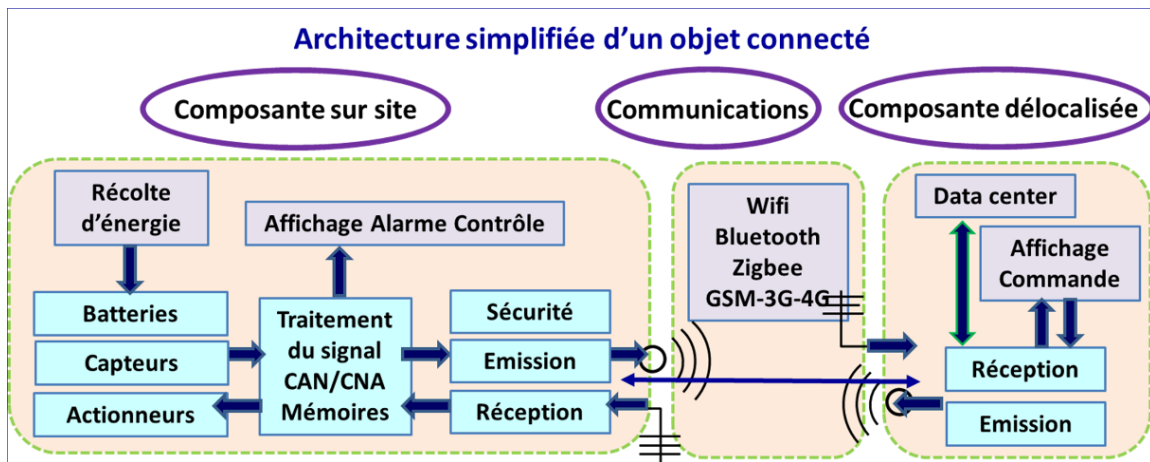


Fig.1. Principe d'un objet connecté. Le signal fourni par un capteur est amplifié, converti en signal numérique, traité et transmis vers une composante délocalisée qui peut être très lointaine.

Le champ des applications est vaste et couvre la majorité des domaines sociétaux (9) comme le montre la figure 2. N'apparaissent sur cette figure, que les domaines les plus marquants et qui sont susceptibles d'un maximum de développement et que sont la santé, le transport, l'environnement, l'énergie, la sécurité et les communications. Pour ces deux derniers, la multiplication des données sous formes d'images et leur traitement notamment avec des applications mettant en œuvre l'I.A. (Intelligence artificielle) constitue un facteur aggravant du nombre de données à traiter et de la consommation d'énergie associée.

La conséquence de cette croissance d'utilisation est multiple. Comme le montre la figure 3, le nombre d'objets connectés et de façon plus générale de l'internet des objets est en croissance exponentielle depuis le début des années 2000 et le nombre de données générées croît exponentiellement et plus rapidement en raison de la complexité croissante des circuits (12). Cette croissance entraîne une croissance également exponentielle de la consommation d'énergie annuelle. Cette dernière pourrait atteindre en 2036 environ 200,000 TWh, ce qui est supérieur à l'énergie mondiale produite en 2018.

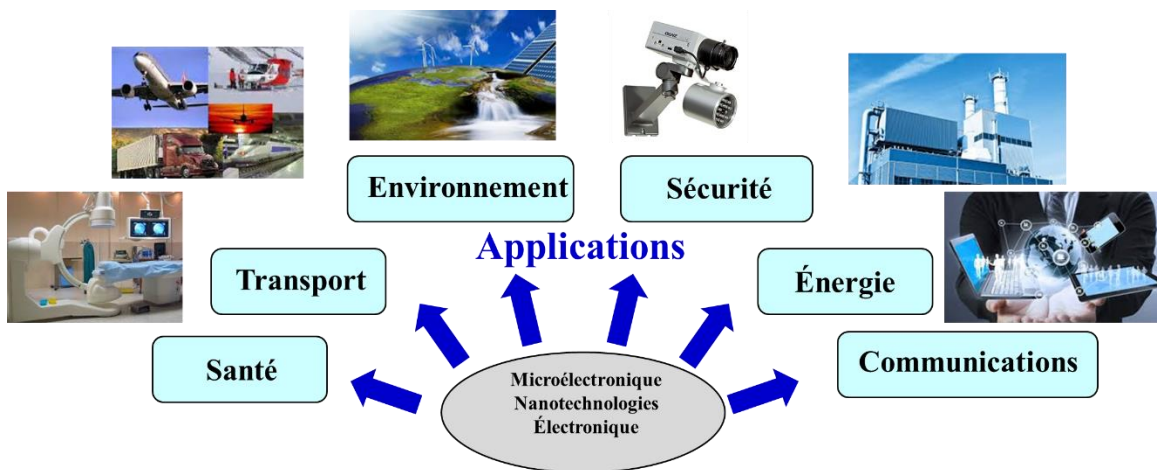


Fig.2. Santé, environnement, communications, sécurité, énergie et transport, constituent les principaux domaines d'application. Tous les secteurs sont en fait concernés. Ceci explique la multiplication des données à engendrer, transmettre, stocker et traiter ensuite dans des centres spécifiques (data centers)

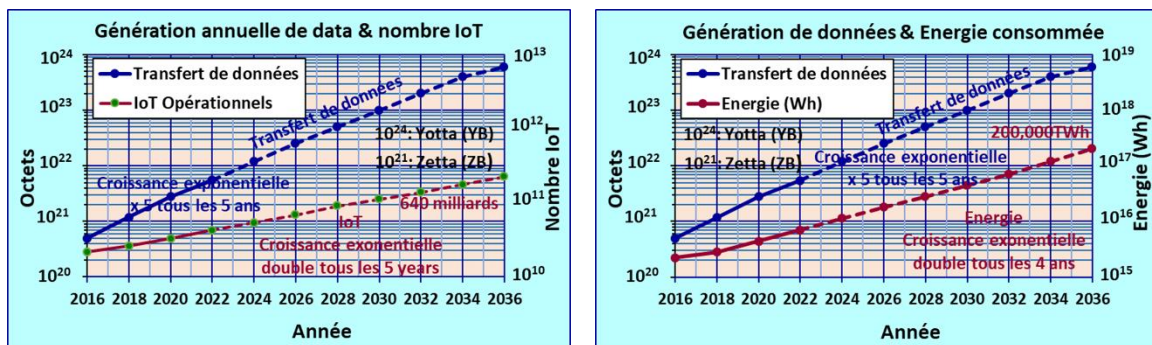


Fig.3. Le diagramme de gauche montre la croissance exponentielle de données engendrées par les IoT en croissance également exponentielle. Le graphe de droite montre la conséquence sur la consommation d'énergie annuelle qui pourrait atteindre 200,000 TWh en 2036.

Il peut être noté que la consommation du numérique correspond dans cette étude à la prise en compte de toute la chaîne qui part des objets personnels comme les iPad, i-phones, les tablettes, les PC personnels, les montres connectées, les ordinateurs, les écrans de visualisation ou moniteurs, les écrans de télévision ou home cinéma, les caméras de surveillance ou de contrôle, mais également le transport des données et l'amplification des signaux vers les serveurs locaux puis le transport éventuellement transocéaniques vers les data centers et le retour. En 2023, près de la moitié de la consommation mondiale est utilisée par les data centers dont 48% sont réservés à leur refroidissement ! En effet, l'électronique associée consommant de l'énergie, une forte densité de systèmes de traitement et de stockage induit une forte densité d'énergie générant de la chaleur qui peut devenir destructrice.

La figure 4 montre l'évolution de la consommation d'énergie qui pourrait suivre la croissance liée au numérique (13). Sans modification du comportement des fabricants de produits, la consommation mondiale d'électricité pourrait dépasser la consommation d'énergie mondiale d'énergie de 2018, toutes sources de production confondues comme le fait apparaître la courbe rouge en pointillé, en supposant toute chose égale par ailleurs. En réalité, la situation risque d'être pire, si une stratégie d'électrification totale de l'énergie se met en place dans des délais ne permettant pas aux systèmes de production de s'adapter.

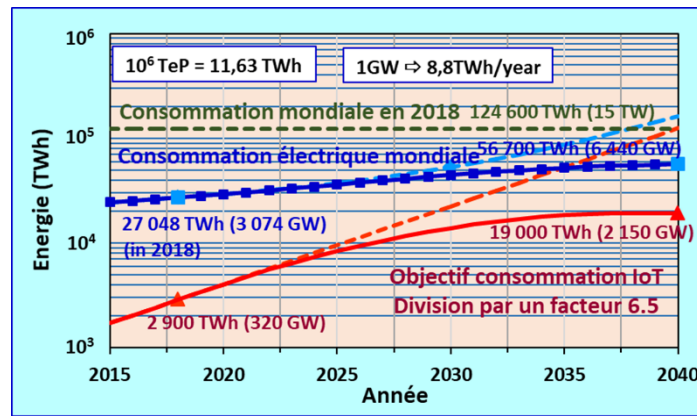


Fig.4. Évolution de la consommation annuelle sur la planète sur les 15 prochaines années. La courbe en rouge (pointillés) montre la limite physique de ce phénomène si aucune mesure de limitation n'est prise. La courbe en rouge (trait plein) présente les objectifs de limitation de consommation.

Comme indiqué précédemment, cette évolution pourrait être fortement ralentie en diminuant progressivement par 10 voire par 100, en moyenne, la consommation de toute l'électronique actuellement utilisée dans tous les systèmes numériques. La courbe en rouge en trait plein de la figure simule la croissance de consommation électrique liée au numérique avec une division progressive de la consommation par un facteur 10 sur les 15 prochaines années. Limiter la consommation mondiale du numérique à 20,000TWh est un objectif réaliste, à condition que toute la planète prenne le problème à bras le corps et traite les défis dans leurs priorités !

III. Les défis technologiques de la microélectronique

Si l'intégration a permis de diminuer la dimension des composants élémentaires à des échelles nanométrique, l'énergie de modification d'une donnée peut devenir extrêmement faible de l'ordre de grandeur du picoJoule. Tout semble parfait, sauf qu'à ces dimensions les effets quantiques surviennent et les couches de matériaux dont les épaisseurs sont de l'ordre du nanomètre sont partiellement conductrices (notamment par effet tunnel). Lorsqu'un circuit comporte des milliards de transistors (cas des mémoires), la somme des courants de fuite devient de plusieurs ordres de grandeur supérieure aux courants « utiles » de traitement des données dans les technologies synchrones où tous les composants sont alimentés par une horloge. Pour certains circuits synchrones fortement intégrés, la surface de l'horloge pilotant l'ensemble des composants élémentaires représente environ le tiers de la surface totale du circuit.

Il faut alors revoir l'architecture des composants élémentaires mais également l'architecture des circuits tout en jouant sur les propriétés des matériaux mis en œuvre. Cet exemple montre l'existence de possibilités potentielles d'amélioration sur l'ensemble de la chaîne numérique (8-10). Ainsi, en détaillant les principaux points d'action, la consommation globale engendre les défis suivants :

- la consommation des composants élémentaires (nouveaux composants, nouveaux matériaux),
- les nouvelles architectures de circuits (fonctionnement asynchrone),
- les nouvelles architectures des systèmes (mise en veille, asservissement par l'énergie),
- la minimisation des transmissions (protocoles et débits adaptés),
- le traitement du signal optimisé (intelligence artificielle),

- la récolte d'énergie locale (transducteurs physiques, chimiques, biologiques),
- la minimisation de l'utilisation des data centers (traitement interne),
- le développement de serveurs locaux (*edge computing*),
- la diminution des pertes de transmission des signaux et des données (absorption, amplifications électriques et optiques, antennes directives).

Il est clair que cette liste n'est pas exhaustive mais qu'elle montre l'ampleur de la tâche qui ne sera menée que si les compétences et savoir-faire sont disponibles au niveau des centres de recherche, des établissements académiques et des entreprises. Cela suppose un accroissement notable du vivier de formés dans ce domaine à tous les niveaux de qualification, ce qui constitue d'autres défis tout aussi importants que les défis technologiques.

IV. Les défis humains

Les besoins en compétences apparaissent sous différentes formes. Dans le cadre du Comité Stratégique de Filière piloté par ACSIEL Alliance Electronique et des groupes de travail sur les compétences et l'emploi (14) auxquels participent plusieurs membres actifs de notre communauté, il a été mis en évidence l'existence de métiers en tension dans le secteur de la microélectronique.

La figure 5 fait apparaître l'écart entre les offres d'emplois et le pourcentage de difficultés de recrutement sur les 10 dernières années (14-15). Il apparaît clairement qu'en moyenne près de 80% des recrutements sont difficiles par manque d'adéquation entre les candidats et les compétences recherchées.

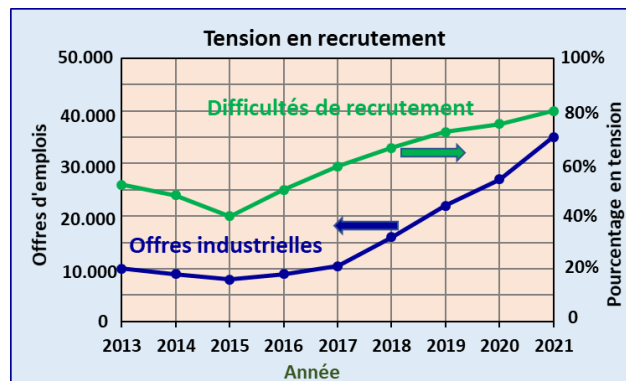


Fig.5. Évolution de la difficulté de recrutement en microélectronique au niveau des entreprises, tous niveaux de formation confondus, du technicien au docteur en passant par l'ingénieur ou master.

En d'autres termes, le nombre d'étudiants dans le domaine scientifique a fortement décliné au cours des 20 dernières années. Dès le baccalauréat, le nombre de candidats s'orientant vers les sciences exactes a tendance à diminuer. Mais de plus, les étudiants qui sont prêts à suivre des études supérieures dans le domaine des technologies de l'information et de la communication préfèrent s'orienter dans le domaine plus conceptuel de l'informatique tels que les réseaux de communications, le Data Mining, ou l'Intelligence Artificielle, que l'électronique et les technologies microélectroniques qui constituent la base de tous les supports physiques des équipements mis en œuvre par les sciences de la communication. Les spécialistes de ces derniers domaines se font de plus en plus rares sachant qu'en parallèle, l'accroissement de la complexité des systèmes nécessite un temps d'apprentissage et d'acquisition des compétences de plus en plus longs.

Une analyse plus fine, fait apparaître des différences notables dans les spécialités et plus particulièrement dans le domaine de l'électronique analogique et des hautes fréquences et dans le domaine de l'électronique de puissance. Le vivier de compétences est ainsi insuffisant et des efforts doivent être menés au niveau de l'attractivité de la discipline [16] et plus particulièrement dans ces spécialités.

Un autre aspect dans la faiblesse du vivier est lié à la très faible présence féminine dans les nouvelles recrues. La figure 6 montre la forte décroissance de la présence féminine au fur et à mesure que le niveau de formation et la spécialisation augmentent (17). Au niveau master ou ingénieur, elle représente seulement 14% de la population employée.

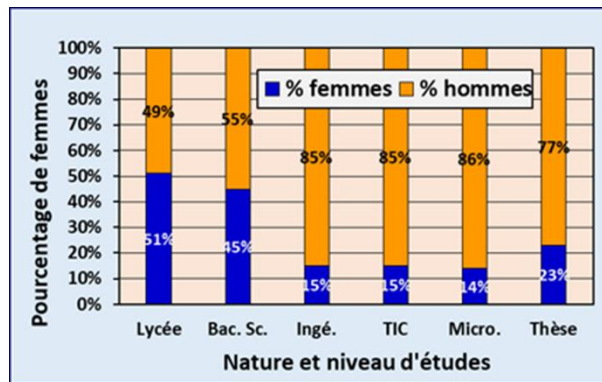


Fig.6. Évolution du pourcentage de femmes dans les études orientées vers la technologie de l'information et la communication et vers la microélectronique Seulement 14% de femmes sont à niveau bac+5 dans la spécialité.

Le défi de ce côté est important et une des solutions pour y faire face est de convaincre la gent féminine de l'importance de sa présence dans de nombreuses applications sociétales à caractère social (médecine et environnement par exemple). Au niveau des entreprises et de la recherche, leur sensibilité différente est importante à prendre en compte dans de nombreuses applications dans lequel elles peuvent être majoritaires comme en santé. Les concepteurs doivent tenir compte de leur approche pour assurer un fonctionnement optimal des nouveaux systèmes dans leur configuration nominale. Mais cela nécessite un investissement important du corps professoral qui devra être soutenu par des actions promotionnelles des médias et par l'organisation d'événements de grande ampleur.

Une première façon d'aborder le problème consiste à sensibiliser les lycéens comme cela se fait depuis des années dans notre réseau (18), malheureusement à une petite échelle compte tenu dans la dimension de la communauté microélectronique nationale (10). Mais il faudra un engagement de l'ensemble des acteurs du domaine avec le soutien des rectorats et donc de l'inspection générale de l'enseignement secondaire pour passer à une vitesse supérieure. Ce point est envisagé dans le futur projet pluriannuel INFORISM (Ingénierie de Formation innovante et stratégique en microélectronique) s'inscrivant dans le programme « Compétences et Métiers d'Avenir » du plan France 2030 (19).

Enfin, une dernière approche pourra consister à attirer des employés d'entreprises en reconversion. Pour cela, il faudra continuer à travailler en symbiose entre les partenaires académiques et industriels et être attentifs aux secteurs en voie de reconversion tel que le secteur automobile thermique lié à une politique gouvernementale volontariste.

V. Les actions du réseau national CNFM

Dans le cadre du projet INFORISM, le GIP-CNFM, chef de file du projet développent des actions destinées à répondre aux défis mentionnés. L'objectif est de continuer à adapter les plateformes des douze pôles interuniversitaires aux besoins manifestés par la profession et à accroître le nombre de formés de tous niveaux, du technicien au doctorat en passant par les masters et les ingénieurs afin de combler le déficit en compétences et d'accroître le vivier. La figure 7 donne quelques exemples de réalisations récentes menées par des étudiants sur les plateformes dans les domaines critiques. Le réseau comporte une centaine de plateformes qui couvrent la quasi-totalité des thématiques prioritaires. Il faut cependant agir en parallèle sur l'attractivité. Un exemple d'actions menées dans ce sens apparaît dans la figure avec des élèves de l'enseignement secondaire.

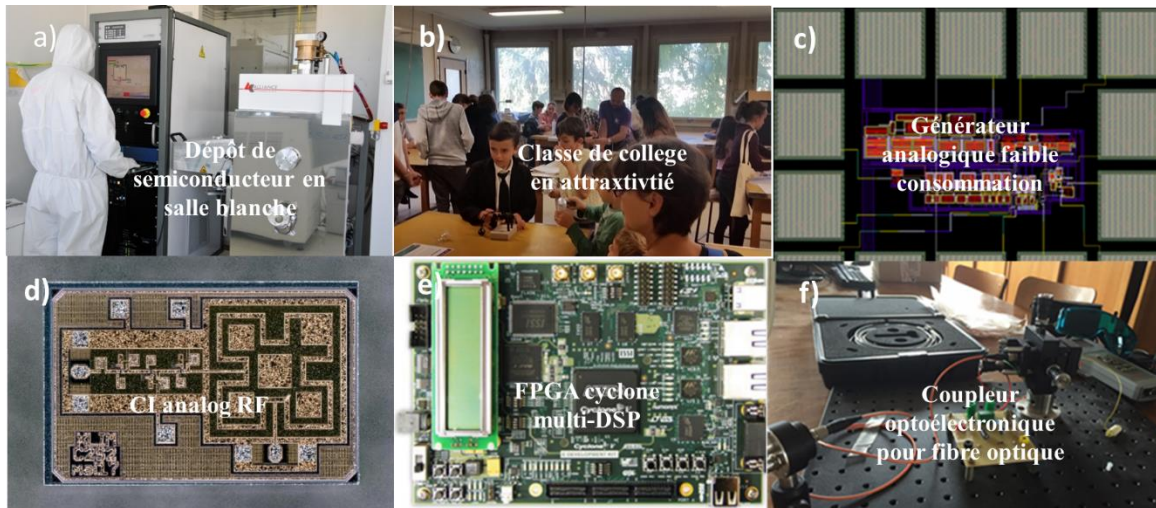


Fig.7. Exemple d'activité menées sur les plateformes du réseau CNFM dans le but de former de nouvelles compétences réclamées par l'industrie et d'attirer des jeunes dans nos disciplines.

VI. Conclusion

L'importance de la microélectronique est indiscutable dans nos sociétés. Elle constitue un des paramètres importants de l'avenir de la planète et devrait permettre de garantir une certaine part de souveraineté technique et industrielle. Les défis à surmonter sont de deux natures, à la fois technique et humaine. Dans le cadre du plan France 2030, la communauté nationale microélectronique a l'opportunité de contribuer significativement à ces objectifs. Les défis sociétaux sont de taille et des solutions existent potentiellement. Toutefois, il faut que l'ensemble de la communauté nationale voire internationale œuvre dans la même direction sur plusieurs années. Les défis ne sont plus locaux mais désormais mondiaux.

Remerciements

L'auteur remercie tous les collègues du réseau CNFM pour l'ensemble de leurs engagements plus particulièrement au niveau des plateformes techniques et technologiques afin de faire face aux défis actuels. Le chemin est encore long mais il faut rester optimistes.

Références

1. G.E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits", Electronics Magazine, vol. 38, no.8, pp. 114-117 (1965).

2. Rao R. Tummala and M. Swaminathan, *System on Package: Miniaturization of the Entire System*, McGraw-Hill Education; 1st edition, (2008).
3. J. Bryzek, "The Trillion Sensors (TSensors) Foundation for the IoT" *Tsensors Summit, Orlando, 9-10 December 2015*, pp 1-63, <https://www.iot-inc.com/wp-content/uploads/2015/11/2-Janusz.pdf>, (2015).
4. O. Bonnaud, "New Approach for Sensors and Connecting Objects Involving Microelectronic Multidisciplinarity for a Wide Spectrum of Applications", *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, vol. 10 (2), pp. 115-120 (2016).
5. "Tsunami of data could consume one fifth of global electricity by 2025," <https://www.theguardian.com/environment/2017/dec/11/tsunami-of-data-could-consume-fifth-global-electricity-by-2025>, (2018).
6. E. Gelenbe and Y. Caseau, "The Impact of Information Technology on Energy Consumption and Carbon Emissions", ACM publication, pp. 1-15, June 2015, <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/2755977> (2015).
7. O. Bonnaud and L. Fesquet, "Microelectronics at the Heart of the Digital Society: Technological and Training Challenges," *SBMicro, IEEEExplore*, pp. 1-4, August 2018.
8. J.-R. Lèquepeys, et al., "Overcoming the Data Deluge Challenges with Greener Electronics", in *Proc. ESSDERC-ESSIRC'2021*, pp. 7-14 (2021).
9. O. Bonnaud et al, Springer Nature 2019, SIST 99, pp. 267–275 (2019).
10. CNFM: "Coordination Nationale Pour La Formation En Microélectronique and Nanotechnologies," www.cnfm.fr, March 2023.
11. O. Bonnaud, P. Gentil, A. Bsiesy, S. Retailleau, E. D. Gergam, and J. M. Dorkel, "GIP-CNFM: A French Education Network Moving from Microelectronics to Nanotechnologies", *IEEE Global Engineering Education Conference*, pp. 122-127, April 2011.
12. O. Bonnaud, L. Fesquet, « Innovation for Education on Internet of Things », *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, vol. 9, pp. 01-08 (2018).
13. Enerdata, "World Energy Production," <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-production.html> (2020).
14. Strategic Committee of the French Electronics Industry: Comité Stratégique de Filière, <https://www.filiere-electronique.fr/en/home/> (last access October 2023)
15. O. Bonnaud, The Five Priority Topics of Microelectronics Training to Meet Future Societal Challenges, 37th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro) IEEEExplore, 979-8-3503-1945-3/23/\$31.00 ©2023 IEEE, Nov. (2023).
16. R. Koduri, "Building the 2030 Workforce: How to attract great students and what to teach them?", IEEE VLSI Symp. (2022).
17. O. Bonnaud, Weak Presence of Women in Microelectronics: Analysis and Suggestions of the French Training Network to be More Attractive, *Journal of Integrated Circuits and Systems* 15(2), pp. 1-5G. (2020).
18. O. Bonnaud, FINMINA: A French National Project Dedicated to Educational Innovation in Microelectronics to Meet the Challenges of a Digital Society Smart Education and e-learning 2020, in V. Uskov, R. Howlett, L. Jain, (Eds. *Smart Innovation Systems and Technologies*:188), Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020, p.31, (2020).
19. INFORISM, INGénierie de FORMations Innovantes et Stratégiques en Microélectronique, projet ANR-23-CMAS-0024-INFORISM au titre du programme France 2030. Ce projet à 5 ans démarre au cours de l'année académique 2023-2024.