

Énergie et numérique : se préparer à un autre combat

Par Jean-Pierre HAUET

Président du Comité scientifique d'Équilibre des énergies

Le numérique est, aujourd'hui, souvent montré du doigt en tant que consommateur effréné d'énergie électrique. Pourtant, des progrès considérables ont été accomplis, mais l'extension des services offerts, l'effet rebond et les excès de quelques applications gloutonnes font que les consommations continueront probablement d'augmenter à l'avenir.

Il est de l'intérêt général de contenir ces consommations, tout en les décarbonant. Mais il faut aussi s'intéresser à leur cause première, c'est-à-dire à l'efficacité même de l'électronique comme moyen de traiter des bits d'informations. On s'aperçoit alors que l'électronique est un processus particulièrement inefficace sur le plan de la thermodynamique, mais qu'il existe aussi des voies de progrès en la matière qui pourraient constituer une véritable révolution, comme l'a été l'arrivée des LED dans le domaine de l'éclairage.

C'est le défi posé à la spintronique qui se propose de piloter les électrons non seulement par leur charge électrique, mais aussi par leur spin. C'est un domaine dans lequel la France dispose de bons atouts, qu'il faut préserver et dont il faut tirer parti.

Une croissance de la consommation électrique qui ne semble pas vouloir s'arrêter

Le transistor, réalisé pour la première fois aux Bell Labs en décembre 1947 par John Bardeen et William Shockley (prix Nobel de physique 1956), est certainement l'invention la plus marquante du XX^e siècle. Ce composant a marqué le début de l'électronique moderne et on le retrouve encore aujourd'hui dans la quasi-totalité des appareils domestiques et professionnels. C'est lui aussi qui, logé par millions au sein des microprocesseurs inventés par Intel en 1971, a permis le développement de l'informatique telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Même si la fameuse loi de Moore tend aujourd'hui à s'infléchir, les progrès n'ont eu de cesse, puisque la densité des transistors présents dans les microprocesseurs a régulièrement doublé pendant des années, au point qu'aujourd'hui 100 milliards de transistors peuvent être logés dans un microprocesseur avec des finesses de gravure de 5 nanomètres, voire 3, selon des technologies que seuls les géants asiatiques (Samsung et TSMC) maîtrisent aujourd'hui.

Ces progrès fantastiques réalisés en termes de miniaturisation, de capacité, de rapidité et de coût ont permis le développement à très grande échelle des industries de l'information et de la communication, sous toutes

leurs formes : appareils domestiques et professionnels, grands calculateurs et centres de données, Internet et réseaux associés, sans oublier l'apparition récente des centres de « minage » des cryptomonnaies, en commençant par le Bitcoin.

Cette expansion des usages du numérique, qui ne semble pas aujourd'hui vouloir se calmer, s'est bien évidemment accompagnée d'une croissance des consommations des énergies – essentiellement l'électricité – nécessaires au fonctionnement des appareils et des infrastructures. Le progrès technique a, pendant de longues années, masqué cette évolution, et ce n'est que relativement récemment que les questions du réchauffement climatique, d'épuisement des ressources naturelles et, plus généralement, d'impact environnemental ont porté la question énergétique sur le devant de la scène. Il faut dire que les consommations élevées des grands centres de données et des immenses fermes de minage du Bitcoin ont à juste titre interpellé les opinions publiques et les responsables politiques sur les problématiques induites.

Il est difficile de savoir avec précision ce que consomment aujourd'hui les industries du numérique, car ces consommations ne correspondent pas aux rubriques que l'on retrouve habituellement dans les bilans énergétiques des États. Une note publiée en septembre 2022 par le Parliamentary Office of Science and Technology de Grande-Bretagne, combinée avec les données de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) mises à jour

en 2022, permet cependant d'en faire une estimation récapitulée dans le tableau suivant.

Secteur	Consommation	% par rapport à la consommation d'électricité mondiale (2021)
Data centers	220 - 320 TWh (2021)	0,9 % - 1,3 %
Crypto mining	100 - 140 TWh (2021)	0,4 % - 0,6 %
Réseaux	260 - 340 TWh (2021)	1,0 % - 1,3 %
Utilisateurs finaux	335 - 535 TWh (2020)	1,3 % - 2,1 %
Total ICT	915 - 1 335 TWh	3,6 % - 5,3 %

Estimation des consommations d'électricité du secteur des industries de l'information et de la communication au titre de l'année 2021 – Sources : UK Parliament POST, Energy Consumption of ICT, POSTNOTE 677, September 2022 ; et Agence internationale de l'énergie, *Data Centres and Data Transmission Networks*, September 2022.

Ces consommations restent orientées à la hausse, car la courbe de l'utilisation du numérique est très loin d'avoir atteint son asymptote et les progrès réalisés sur les consommations unitaires ne compensent pas l'accroissement des consommations induites par le développement des communications et des usages de l'informatique sous des formes de plus en plus variées.

Il faudrait en outre tenir compte de l'énergie grise embarquée par les équipements de stockage et de traitement, les équipements des réseaux et les appareils exploités par les utilisateurs finaux. Cette énergie grise, qui doit être évaluée en termes de cycle de vie, est encore plus mal connue que l'énergie consommée en exploitation. Certains l'évaluent à environ 30 % des consommations finales.

À court et moyen terme : sobriété, efficacité, optimisation

Pour contenir cette évolution et faire en sorte que les consommations énergétiques du numérique ne prennent pas des proportions excessives au point de

remettre en cause les fondements mêmes de la révolution qu'il représente, plusieurs actions se développent en parallèle.

Ce sont tout d'abord les incitations à faire preuve de « sobriété » : non seulement chez les particuliers, en les invitant à éviter de maintenir sous tension des équipements qui n'ont pas de raison de l'être, mais aussi chez les professionnels, en leur demandant de s'abstenir de générer du trafic inutile et de faire preuve d'« hygiène énergétique » : audits et suivi des températures et des consommations, déconnexion des serveurs inutilisés, etc.

Ce sont ensuite la gestion de toutes les consommations auxiliaires nécessaires au traitement des données, en particulier la réduction, dans les centres de données, des consommations liées au refroidissement des serveurs et des *switches* : utilisation de l'air ambiant et bonne organisation des circulations d'air ou, dans le cas d'un refroidissement par l'eau, utilisation de ressources locales et récupération des calories rejetées pour chauffer des logements ou des bureaux.

Un indicateur usuellement utilisé est le PUE (ou Power Usage Effectiveness), qui rapporte l'énergie totale consommée à celle consommée uniquement par les équipements de traitement de l'information. Un PUE de 1,2 signifie que le centre de données affiche un taux de pertes de 20 %. Les PUE de la plupart des centres de données ont décliné fortement au cours des dernières années. Google annonce des PUE moyens de l'ordre de 1,10 (voir la Figure 1 ci-dessous), ce qui semble correspondre à une asymptote.

Un autre levier important est celui de l'optimisation. Celle-ci doit être envisagée à plusieurs niveaux.

Tout d'abord, au niveau des protocoles de transfert et de traitement des données. Certains conduisent à collecter et à véhiculer des masses considérables de données qui, pour la plupart, sont inutiles, d'autres offrent un rapport médiocre entre la charge utile des datagrammes et la longueur totale des messages incluant les *overheads* des préambules et postam-

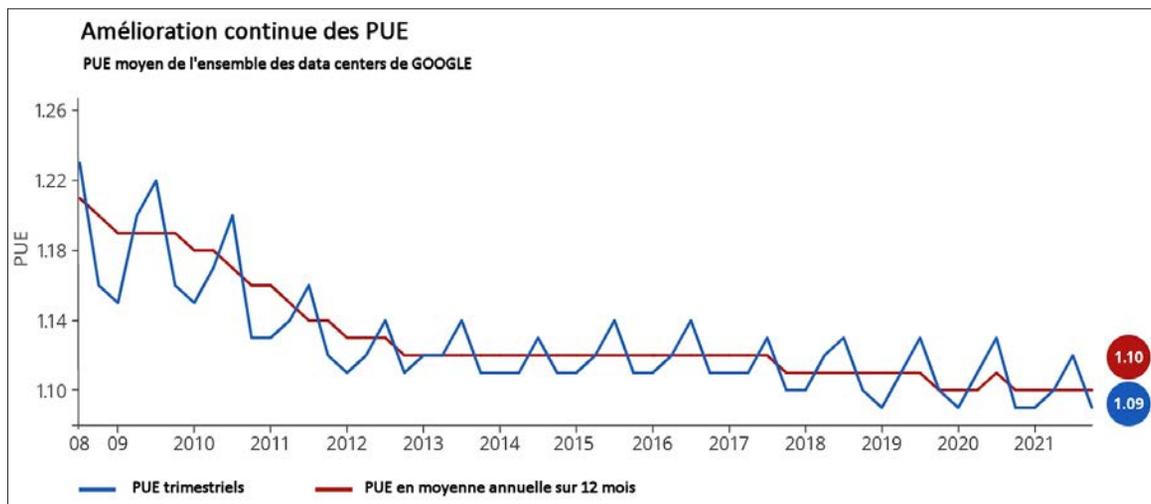


Figure 1 : Évolution du PUE moyen des centres de données de Google – Source : Google.

bules. Ainsi, le protocole pub/sub MQTT¹ peut s'avérer 1 000 fois plus efficace que des protocoles client-serveur de *polling* collectant inutilement, à cadence rapide, des données, dont très peu ont varié.

L'optimisation doit porter également sur les architectures de systèmes : faut-il envoyer des données dans un *cloud* public, *via* Internet, alors qu'un stockage ou un traitement local, en *edge computing*, serait plus approprié ? Faut-il laisser éveillés en permanence des équipements qui n'ont rien à transmettre, alors qu'il est possible d'utiliser des processus de réveil périodique ou aperiodique ?

Une autre voie d'optimisation, et non des moindres, est celle des architectures physiques des microprocesseurs. L'accroissement considérable de la finesse de gravure, qui est passée en cinquante ans de 10 μm à 3 nm, et la miniaturisation qui s'ensuit ont eu un effet drastique sur la réduction des consommations.

Toutes ces actions permettent de réduire fortement les consommations unitaires. Ainsi est-il affirmé que la 5G est, par unité de trafic, dix fois plus efficace que les réseaux de radiocommunications actuellement en service². Cependant, il est clair que l'accroissement du nombre des abonnés, lié notamment à l'avènement de l'Internet des objets, la diversification des services et l'amélioration des performances nécessiteront plus de stations de base, plus de traitements, plus de centres de données, plus d'antennes et, *in fine*, plus d'énergie.

Face à la nécessité de contenir les consommations et les émissions liées au numérique, l'exemple des

centres de données et du plafonnement du PUE amène à s'interroger non plus seulement sur la façon d'utiliser efficacement l'électronique dans les traitements numériques, mais aussi sur le procédé lui-même, c'est-à-dire sur le futur de l'électronique.

L'électronique : un procédé extraordinairement inefficace

L'électronique actuelle, née du transistor, a quelque chose en commun avec la lampe à incandescence : ce sont deux inventions fondamentales qui ont révolutionné la vie quotidienne. La lampe à incandescence, inventée par Thomas Edison en 1879 et ayant été la vedette de l'Exposition internationale de l'électricité de Paris en 1881, a tellement apporté de progrès à l'humanité que l'on a cru, pendant des décennies, qu'elle serait éternelle. On en oubliait le rendement lumineux très médiocre (de l'ordre de 1,5 %) pour ne voir que les services qu'elle nous rendait. Pendant plus d'un siècle, on a vécu avec elle, jusqu'à ce qu'arrive, après quelques errements du côté des lampes fluorescentes, les diodes électroluminescentes, dont le rendement lumineux se trouve multiplié par un facteur 10.

Ce résultat ne s'est pas fait en un jour et la saga de l'éclairage, résumée par la Figure 2 ci-dessous, a comporté beaucoup d'étapes, aucune n'étant vraiment décisive, jusqu'à ce que les LED s'imposent sur le marché.

L'électronique a de son côté remarquablement progressé. Il suffit pour s'en convaincre de comparer les

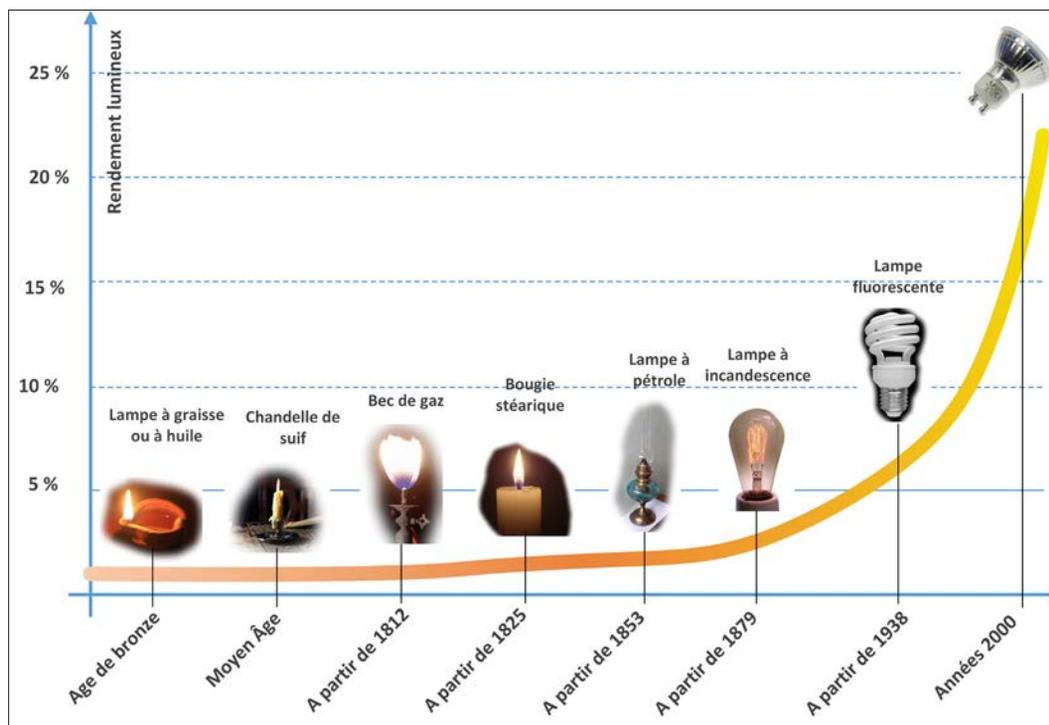


Figure 2 : La saga de l'éclairage –
Source : auteur du présent article.

¹ MQTT : Message Queuing Telemetry Transport.

² Voir le communiqué de Nokia en date du 2 décembre 2020, <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/12/02/nokia-confirms-5g-as-90-percent-more-energy-efficient/>

tubes à vide des années 1950 aux microprocesseurs d'aujourd'hui, ou bien encore les mémoires à tores de ferrite qui équipaient les fameux IBM 360 des années 1970 avec les mémoires flash qui équipent nos ordinateurs actuels et dont le coût est 15 millions de fois moins élevé.

Cependant, l'électronique actuelle reste sur le plan thermodynamique, c'est-à-dire de l'efficacité énergétique, extraordinairement inefficace. Les traitements numériques reposent sur une succession de basculements de bits entre le 0 et le 1, et vice-versa. Or, il a été démontré, théoriquement et expérimentalement, que l'écrasement d'un bit était une source d'entropie et dégageait une chaleur minimale que l'on appelle la limite de Landauer³.

Celle limite s'écrit : $kT \ln 2$, où :

- k est la constante de Boltzmann (approximativement $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$) ;
- T est la température du système physique considéré, en kelvins ;
- $\ln 2$ est le logarithme népérien de 2 (approximativement 0,693).

Théoriquement, la mémoire d'un ordinateur à température ambiante fonctionnant à la limite de Landauer (soit $2,75 \times 10^{-21} \text{ J}$ par bit à 20°C) pourrait être modifiée à la vitesse d'un milliard de bits par seconde, avec seulement 2,85 trillièmes de watt de puissance se dégageant dans le module de mémoire. Les ordinateurs modernes utilisent des millions de fois plus d'énergie⁴ !

AlphaGo: 150 kW

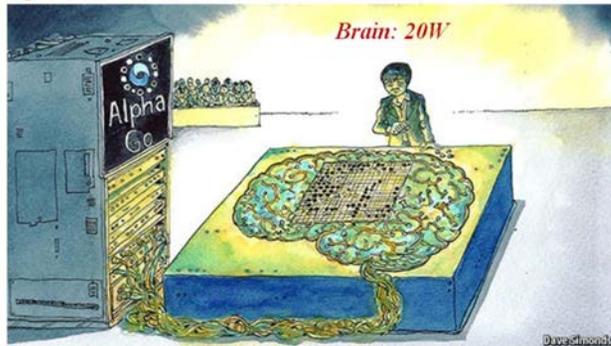


Figure 3 : "The brain is the winner" – Source : ©Dave Simonds.

Pour se convaincre de l'inefficacité thermodynamique de l'électronique actuelle, il suffit de comparer le cerveau humain au plus grand des calculateurs (voir la Figure 3 ci-dessus). Le cerveau humain brûle environ

4,2 g de glucose par heure⁵, ce qui équivaut à une puissance de 38 W. Le plus grand ordinateur au monde, actuellement le Frontier en service aux États-Unis, consomme une puissance électrique de 21 MW pour une puissance de calcul de 1,102 exaflop/s⁶.

Un calcul en ordre de grandeur permet de conclure, qu'à puissance électrique égale, le cerveau humain est près de 10 000 fois plus efficace que les plus grands calculateurs actuels. L'électronique se situe donc aujourd'hui tout au bas de la courbe d'une évolution comparable à celle qu'a connue l'éclairage et qui permettra sans doute, d'ici quelques dizaines d'années, de regarder les grands centres de données, ces dévoreurs d'énergie que l'on construit actuellement, comme on contemple aujourd'hui les lampes à huile.

Que sera l'électronique du futur ?

Quand on parle d'électronique du futur, on pense à l'ordinateur quantique qui fait aujourd'hui beaucoup parler de lui. Les technologies quantiques ont déjà des applications, notamment dans le chiffrement des données, la distribution de l'heure, la microscopie et les capteurs. L'ordinateur quantique n'est pas à un stade aussi avancé.

On connaît un petit nombre d'algorithmes, comme l'algorithme de Shor, qui permettront de résoudre, grâce à des calculateurs quantiques, des problèmes difficiles, tels que la factorisation des entiers naturels. Beaucoup de systèmes classiques de chiffrement, tel le RSA, deviendront alors vulnérables. Le monde s'y prépare. Mais il n'est pas sûr que les calculateurs quantiques puissent connaître une application générale.

Par ailleurs, la réalisation physique des calculateurs quantiques nécessite que l'on puisse construire des machines permettant de gérer des milliers de qubits, portés par des particules ou des photons intriqués, dont la cohérence des états quantiques devra pouvoir être maintenue pendant un laps de temps suffisant pour exécuter les algorithmes. Cette préservation de la cohérence nécessite de travailler à l'abri de toute perturbation par le milieu environnant et donc à des températures très proches du zéro absolu. Il y a donc peu de chances, en l'état actuel de nos connaissances, de pouvoir nous doter, sauf pour des applications spécifiques, de calculateurs plus efficaces énergétiquement que ceux que nous connaissons aujourd'hui.

L'optique continuera à jouer un rôle croissant pour assurer les liaisons, peut-être aussi pour la commutation et le stockage. Mais l'architecture d'un ordinateur photonique reste à imaginer.

L'ordinateur biologique est une autre voie que certains investiguent, mais qui semble encore bien lointaine.

Aujourd'hui, il nous semble qu'en raison de son niveau d'avancement et de la continuité industrielle qu'elle peut

³ Rolf Landauer était un chercheur d'IBM qui a énoncé, pour la première fois en 1961, le principe qui porte aujourd'hui son nom. Ce principe, qui conforte le lien entre la théorie de l'information et la thermodynamique, a été pour la première fois vérifié expérimentalement en 2012 par des chercheurs du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Lyon, en collaboration avec un groupe allemand de l'Université d'Augsbourg.

⁴ Source : l'article de Wikipédia consacré au principe de Landauer, https://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_de_Landauer

⁵ Source : Julie Grollier, directrice de recherche à l'Unité mixte de physique CNRS/Thales.

⁶ 1 exaflop/s = 10^{18} opérations en virgule flottante par seconde.

offrir par rapport à l'électronique actuelle, que la spintronique – ou électronique du spin – est la technique qui offre les meilleures perspectives de développement pour les décennies à venir.

La spintronique tient la corde

L'électronique d'aujourd'hui manipule, comme son nom l'indique, des électrons. Mais elle le fait en n'utilisant qu'une seule de leurs propriétés intrinsèques : la charge électrique. Or, les électrons en possèdent une autre qui est leur moment magnétique, autrement appelé « spin ». Le spin, qui peut être représenté de façon imagée comme un petit aimant, est une grandeur quantique qui, dans le cas des électrons, peut prendre deux valeurs : $+\frac{1}{2}$ (*up*) ou $-\frac{1}{2}$ (*down*) (voir la Figure 4 ci-contre).

Dans un courant électrique ordinaire, les spins se répartissent de façon égale entre le *up* et le *down*. Mais lorsque ce courant d'électrons traverse un champ magnétique, par exemple au travers d'un conducteur magnétique (fer, cobalt, nickel), dont les atomes constitutifs possèdent eux-mêmes une valeur de spin (du fait de la répartition des électrons dans les différents niveaux

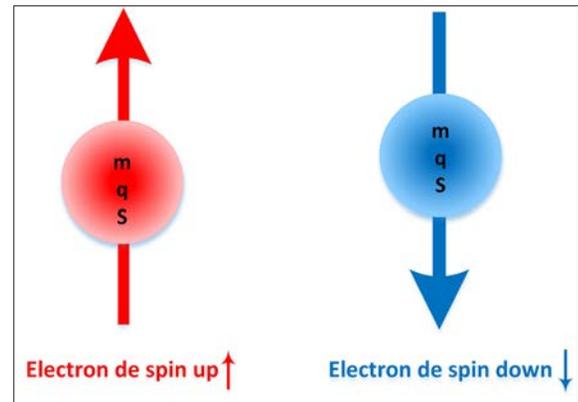


Figure 4 : Le spin des électrons.

d'énergie), les électrons dont le spin correspond à l'aimantation régnant dans le conducteur se propagent mieux que les électrons de spin opposé. Le courant est en quelque sorte polarisé par le champ magnétique. Cet effet augmente la résistance électrique du matériau. Cet effet, que l'on appelle **magnétorésistance**, a été découvert dès 1857 par William Thomson. Mais c'est un effet de faible intensité, et ce n'est que récemment (en 1988) que, grâce aux travaux du Français,

Les principes de la magnétorésistance géante (GMR)

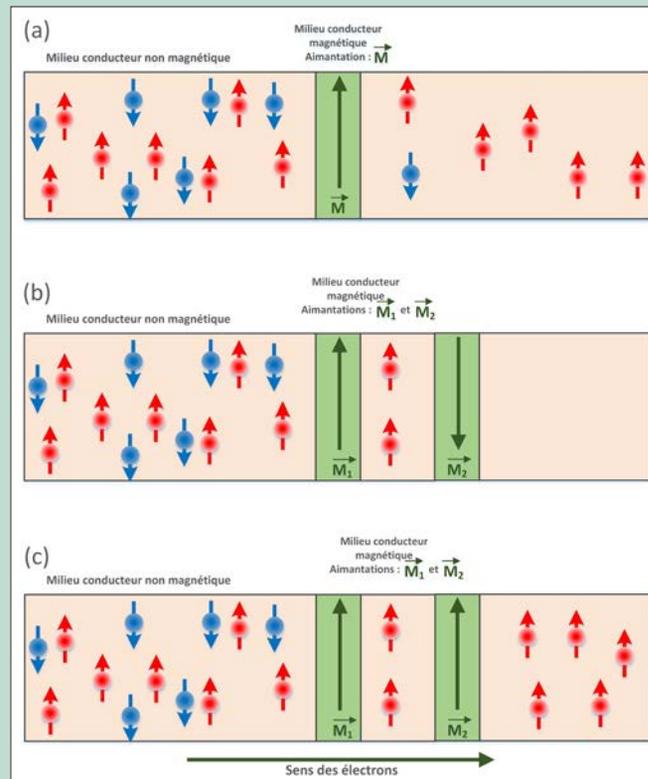
L'idée générale est d'empiler des couches suffisamment minces pour que la polarisation en spin des électrons qui les auront traversées soit conservée, en alternant matériaux conducteurs non magnétiques et matériaux conducteurs magnétiques.

Lorsqu'un électron de spin donné traverse une couche magnétique dont l'aimantation, notée M_1 , va dans la même direction que son spin, il a dès lors de fortes chances de la traverser (voir la Figure 5-a ci-contre).

Si l'on installe une deuxième couche d'aimantation (M_2), cette deuxième couche laissera passer ou ne laissera pas passer les électrons qui auront déjà traversé la première couche, selon que l'aimantation M_2 sera parallèle ou antiparallèle à M_1 (voir les Figures 5-b et 5-c ci-contre).

On a ainsi réalisé un filtre à électrons en fonction de leur spin ; il est alors facile de montrer que la résistance électrique équivalente du système varie fortement selon que M_1 et M_2 sont parallèles ou non.

Figure 5 : Les principes de la magnétorésistance géante –
Source : Hélène Fischer,
Université de Lorraine.



Albert Fert, et de l'Allemand, Peter Grünberg (tous deux prix Nobel de physique en 2007), a été découverte la **magnétorésistance géante (GMR)**, c'est-à-dire la possibilité, par un effet quantique observé dans des structures de films minces composées d'une alternance de couches magnétiques et de couches non magnétiques, de baisser de façon très importante la résistance observée sous l'application d'un champ magnétique externe (voir l'Encadré de la page précédente).

Ce résultat est amplifié lorsque l'on associe la GMR à la **magnétorésistance tunnel (TMR)**, qui a été découverte en 1975 par le Français, Michel Jullière, et dans laquelle la résistance électrique opposée au passage par effet tunnel du courant d'un matériau à l'autre au travers de la couche isolante varie en fonction de l'orientation relative de l'aimantation des deux couches de matériaux. La TMR a conduit au développement des jonctions magnétiques à effet tunnel (voir la Figure 6 ci-dessous), qui sont à la base d'applications industrielles importantes rendues possibles par le développement des techniques de dépôt en couches minces, telles que la fabrication de capteurs de champs magnétiques ultra-sensibles, destinés en particulier aux têtes de lecture des disques durs d'ordinateur, et les mémoires magnétiques à accès direct (MRAM) qui combinent les avantages des SRAM (la vitesse) et des FLASH (non-volatilité) et affichent une endurance quasi infinie.

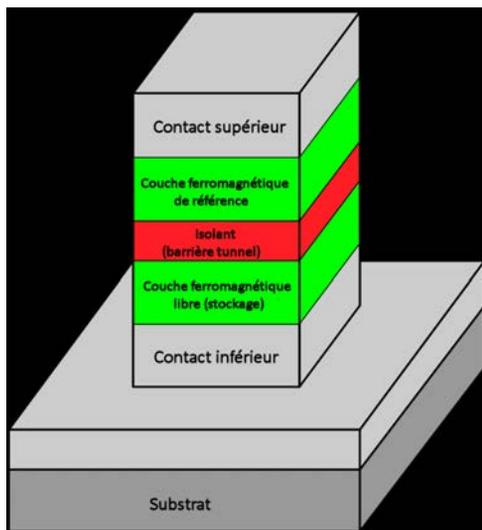


Figure 6 : Schéma d'une jonction tunnel MTJ. Les magnétisations de chacune des couches ferromagnétiques peuvent être orientées par des champs magnétiques externes (créés, par exemple, par des lignes conductrices situées au-dessus et en dessous de la cellule MTJ). Selon que les directions sont parallèles ou anti-parallèles, la cellule laisse ou ne laisse pas passer le courant, ce qui permet de lire ou d'écrire l'information stockée dans la couche libre – Source : d'après Wikipédia.

Ces mémoires magnétiques demeurent un important sujet de recherche, notamment pour l'amélioration des techniques d'écriture de façon à réduire le courant d'écriture ainsi que les dimensions de la cellule.

Une technologie, dite STT-MRAM, utilise un deuxième effet essentiel pour la spintronique, qui est le **transfert de spin (STT : Spin Transfer Torque)**. Il s'agit cette

fois d'un effet de surface permettant à la couche ferromagnétique libre d'être aimantée par interaction tunnel avec un courant de spin circulant dans une couche inférieure. Ce courant de spin est lui-même créé en utilisant l'**effet Hall de spin quantique**, qui renvoie vers la périphérie du conducteur les électrons d'un spin donné sous l'influence d'un champ magnétique parallèle au feuillet (voir la Figure 7 ci-dessous). Les premières mémoires STT-RAM sont apparues en 2013⁷.

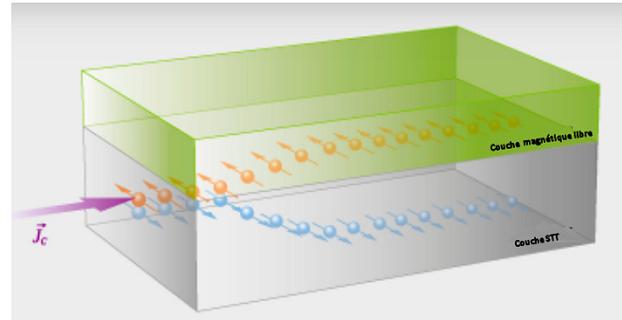


Figure 7 : Schématisation de l'effet Hall de spin.

Un mode d'écriture encore plus performant utilise l'**interaction spin-orbite** (couplage du champ magnétique interne lié au mouvement orbital de l'électron avec son spin) et l'effet Rashba. Il a donné naissance à la technologie SOT-MRAM, qui s'avère être encore plus performante en termes de densité et de consommation d'énergie que la technologie STT-RAM.

Toutes ces technologies illustrent la possibilité de manipuler des courants avec des aimants de taille nanométrique et, inversement, de contrôler des aimantations par des courants.

La spintronique ouvre d'autres perspectives. Au lieu de stocker l'information dans les nano-aimants des jonctions MTJ, il semble possible de la stocker dans des tourbillons de spin que l'on appelle des skyrmions (voir la Figure 8 ci-dessous) et que l'on ferait défiler, sans faire appel à des auxiliaires mécaniques, sous des têtes de lecture spintroniques.

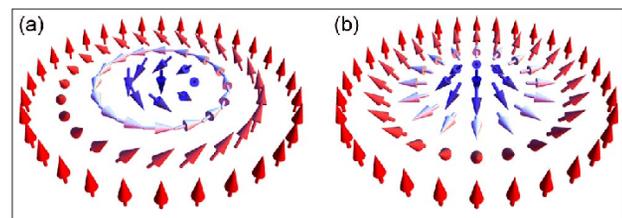


Figure 8 : Schémas de skyrmions de type Bloch (a) et de Néel (b) – Source : Skyrmion-Electronics: An Overview and Outlook. WANG Gang *et al.*, IEEE, octobre, 2016.

Par ailleurs, et c'est peut-être là le point essentiel, on a vu que le concept de MTJ associé à la fois capacité mémoire et traitement de l'information. Ce serait là le moyen de s'affranchir du modèle d'architecture de Von

⁷ Société Everspin Technologies, <https://www.everspin.com/>

Neumann élaboré en 1945 et qui reste à la base des calculateurs actuels, et dans lequel mémoire et processeur sont des entités distinctes nécessitant des allers et retours incessants générateurs de dissipation d'énergie et d'augmentation des temps de calcul (voir la Figure 9 ci-dessous).

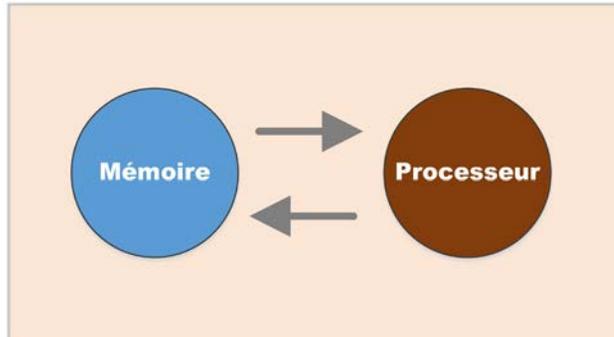


Figure 9 : Principes simplifiés de l'architecture de Van Neumann.

Les applications potentielles de la spintronique vont dès lors bien au-delà de la seule question des mémoires.

Le laboratoire dirigé par Sophie Grollier, directrice de l'Unité mixte de physique CNRS/Thales de Palaiseau, a démontré la possibilité de construire des nano-oscillateurs de spin (STNO) permettant d'émuler, par multiplexage temporel de leurs radio-émissions, les réseaux de neurones tels qu'on les utilise aujourd'hui en matière d'intelligence artificielle. Le gain en efficacité serait de l'ordre de 100 et ces réseaux neuro-morphiques, utilisant l'approche dite *reservoir computing*, seraient un moyen de se rapprocher de l'architecture du cerveau, dont on a vu qu'elle était beaucoup plus efficace que celle de nos plus grands calculateurs et dans laquelle quelques 10^{11} neurones sont associés à 10^{15} synapses qui sont étroitement imbriqués ; les neurones étant responsables des traitements, tandis que les synapses supportent la mémoire.

En conclusion

Les consommations d'énergie liées aux industries de l'information et de la communication continuent de croître, en dépit des progrès considérables réalisés au cours des dernières années afin d'améliorer l'efficacité énergétique des traitements. Il est possible qu'en 2030, le numérique représente près de 10 % de la consommation totale d'électricité dans le monde. Bien entendu, le numérique est porteur de progrès social et ses applications permettent de contenir les consommations d'électricité qui sont nécessaires dans les secteurs du bâtiment, de l'industrie et des transports.

Cependant, dans le contexte tendu que nous connaissons aujourd'hui et qui est probablement appelé à durer, il est de l'intérêt de tous de poursuivre les efforts faits pour mieux utiliser l'énergie, en limiter les consommations et la réutiliser chaque fois que cela est possible, mais surtout de donner une absolue priorité aux énergies décarbonées.

Néanmoins, et parce que les besoins continueront à croître dans tous les domaines et parce que d'immenses champs d'application restent à défricher, les efforts à réaliser à court et moyen terme ne doivent pas nous détourner de la nécessité de nous doter d'une vision de long terme. Dans le cas du numérique, il faut s'interroger sur l'efficacité du procédé de base auquel il fait appel, celui de l'électronique classique. Nous avons montré dans cet article que l'électronique, qui apporte tant de services et de satisfactions, reste néanmoins un processus thermodynamiquement inefficace. Le parallèle fait avec le cerveau humain montre qu'il existe des voies de progrès, et l'électronique de spin – ou spintronique – en est une.

La France est bien placée dans ce domaine avec les travaux menés au CEA, au CNRS et dans différentes universités (Grenoble, Paris Cité, Paris Saclay, Lorraine...), mais aussi chez Thales et dans d'autres entreprises (Crocus Technology). À horizon 2050, le défi est celui-ci : quelle solution viendra à cet horizon remplacer notre électronique, comme les LED ont remplacé les lampes à incandescence ?