

## Comment fonctionnent les SSD

**Vous êtes-vous déjà demandé comment les SSD lisent et écrivent les données, ou ce qui détermine leurs performances? Notre explicateur technique vous couvre.**

**Lexique:**

**SSD signifie:**

**Solid State Disc**

**NAND signifie:**

**La NAND est une mémoire flash non volatile qui peut conserver des données même lorsqu'elle n'est pas connectée à une source d'alimentation.**

**NAND signifie « NOT AND » et fait référence à l'opérateur booléen ou à la porte logique qui commande le circuit interne d'une cellule NAND.**

**Un opérateur NAND produit une valeur FAUX uniquement si les deux entrées ont pour valeur VRAI.**

**DRAM signifie: La mémoire vive dynamique (en anglais DRAM pour Dynamic Random Access Memory) est un type de mémoire vive compacte et peu dispendieuse.**

**Supplément d'information:**

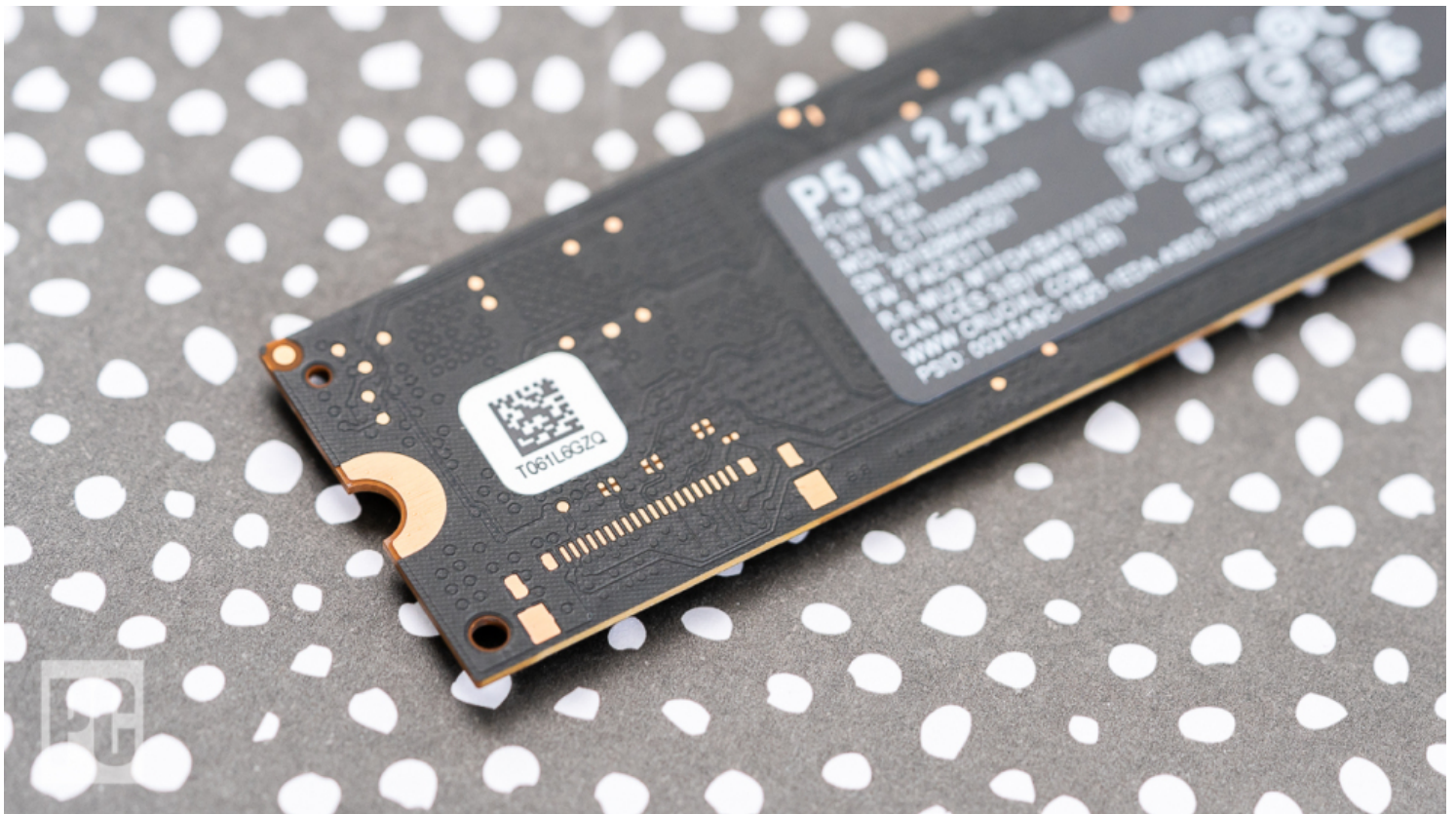
**Différences entre les NAND SLC, MLC, TLC et 3D dans les clés USB, SSD et les**

**cartes mémoire**

**Lien: Différences entre les NAND SLC, MLC, TLC et 3D dans les clés USB, SSD et**

**les cartes mémoire - Kingston Technology**

Joel Hruska, Jamie Lendino :



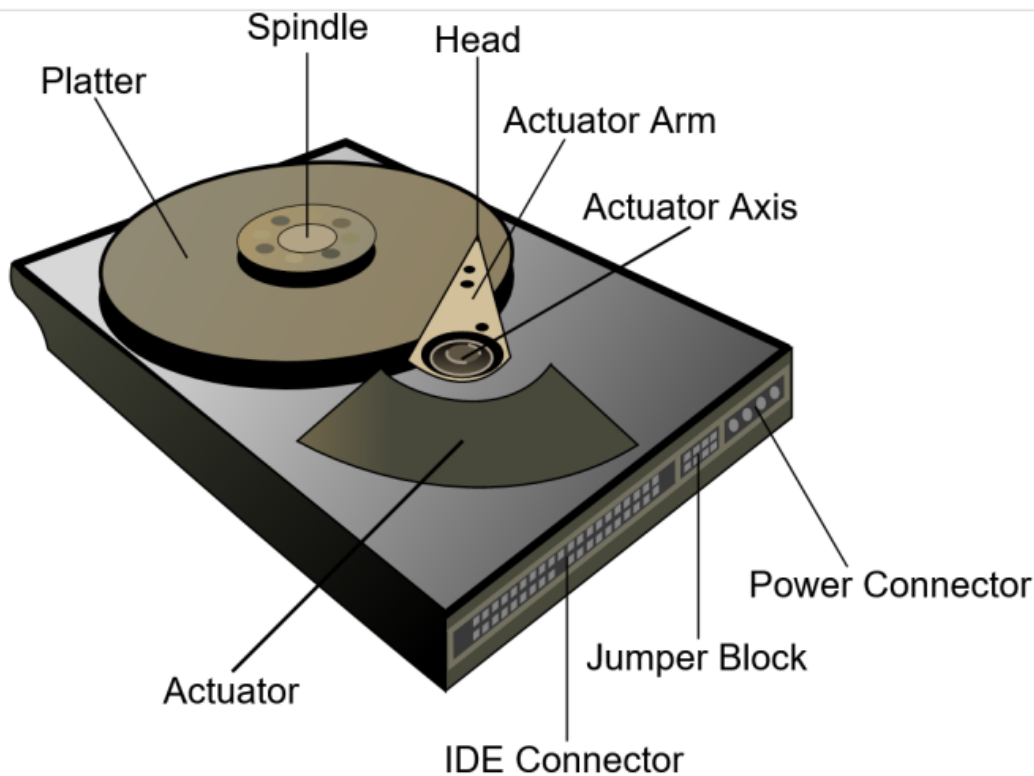
Crédit : PCMag

Chez ExtremeTech, nous avons souvent discuté de la différence entre les différents types de structures [NAND : NAND verticale](#) versus planaire, ou cellule multi-niveaux (MLC) versus cellules à [triple niveau](#) (TLC) et [cellules à quatre niveaux](#) (QLC).

Maintenant, parlons de la question pertinente plus fondamentale: comment fonctionnent les SSD en premier lieu et comment se comparent-ils aux nouvelles technologies?

### Au commencement...

Pour comprendre comment et pourquoi [les SSD](#) sont différents des disques rotatifs, nous devons parler un peu des disques durs. Un disque dur stocke des données sur une série de disques magnétiques en rotation appelés plateaux.



Ce diagramme montre un ancien entraînement de style PATA, mais l'actionneur et les plateaux sont toujours conceptuellement les mêmes.  
Crédit : Surachit/CC BY-SA 3.0

Le bras de l'actionneur au-dessus positionne les têtes de lecture-écriture sur la zone correcte du lecteur pour lire ou écrire des informations.

Étant donné que les têtes de lecteur doivent s'aligner sur une zone du disque pour pouvoir lire ou écrire des données, et que le disque tourne constamment, il y a un délai avant que les données puissent être consultées.

Le lecteur peut avoir besoin de lire à partir de plusieurs emplacements afin de lancer un programme ou de charger un fichier, ce qui signifie qu'il peut devoir attendre que les plateaux tournent dans la bonne position plusieurs fois avant de pouvoir terminer la commande.

Si un lecteur est en veille ou dans un état de faible consommation, il peut s'écouler plusieurs secondes de plus avant que le disque ne tourne à pleine puissance et commence à fonctionner.

Dès le début, il était clair que les disques durs ne pouvaient pas correspondre aux vitesses auxquelles les processeurs pouvaient fonctionner.

La latence des disques durs est mesurée en millisecondes, contre quelques nanosecondes pour votre processeur typique.

Une milliseconde correspond à 1 000 000 nanosecondes, et il faut généralement 10 à 15 millisecondes à un disque dur pour trouver des données sur le lecteur et commencer à les lire.

L'industrie des disques durs a introduit des plateaux plus petits, des caches de mémoire sur disque et des vitesses de broche plus rapides pour contrer cette tendance, mais les disques mécaniques ne peuvent tourner que si vite.

La famille VelociRaptor de 10 000 tr/min de Western Digital est l'ensemble de variateurs le plus rapide jamais construit pour le marché grand public, tandis que certains disques d'entreprise ont tourné aussi rapidement que 15 000 tr/min.

Le problème est que même le lecteur tournant le plus rapidement avec les plus grands caches et les plus petits plateaux sont toujours douloureusement lents en ce qui concerne votre processeur.

## En quoi les SSD sont différents

« Si j'avais demandé aux gens ce qu'ils voulaient, ils auraient dit des chevaux plus rapides. » - Henry Ford

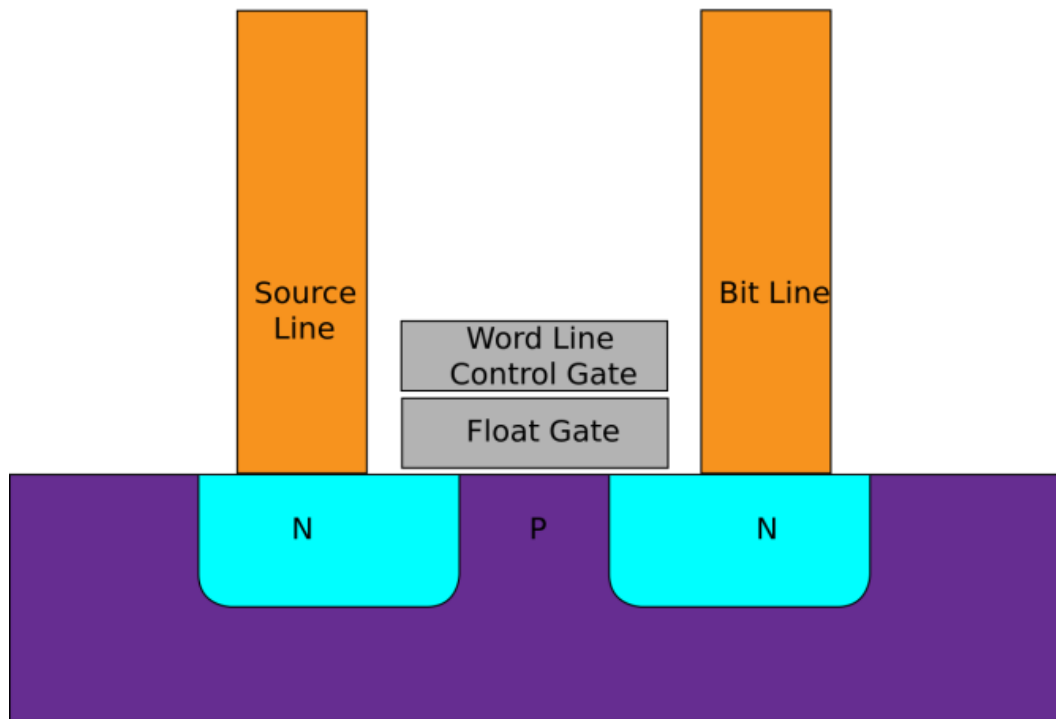
Les disques SSD sont appelés ainsi spécifiquement parce qu'ils ne reposent pas sur des pièces mobiles ou des disques en rotation.

Au lieu de cela, les données sont enregistrées dans un pool de flash NAND.

La NAND elle-même est composée de ce qu'on appelle des transistors à grille flottante. Contrairement aux conceptions de transistors utilisées dans la DRAM, qui doivent être actualisées plusieurs fois par seconde, la mémoire flash NAND est conçue pour conserver son état de charge même lorsqu'elle n'est pas sous tension.

Cela fait de la NAND un type de mémoire non volatile.

La DRAM, en revanche, est volatile : elle perd des données si elle n'est pas rapidement actualisée.



Crédit : Cyferz

Le diagramme ci-dessus montre une conception de cellule flash simple.

Les électrons sont stockés dans la porte flottante, qui se lit alors comme chargé « 0 » ou non chargé « 1 ».

Oui, dans la mémoire flash NAND, un 0 signifie que les données sont stockées dans une cellule - c'est le contraire de la façon dont nous pensons généralement à un zéro ou à un. La mémoire flash NAND est organisée dans une grille.

La disposition de grille entière est appelée bloc, tandis que les lignes individuelles qui composent la grille sont appelées une page.

Les tailles de page courantes sont 2K, 4K, 8K ou 16K, avec 128 à 256 pages par bloc.

La taille du bloc varie donc généralement entre 256 Ko et 4 Mo.

Un avantage de ce système devrait être immédiatement évident.

Parce que les SSD n'ont pas de pièces mobiles, ils peuvent fonctionner à des vitesses bien supérieures à celles d'un disque dur typique.

Le graphique suivant montre la latence d'accès pour les supports de stockage typiques donnée en microsecondes.

|                    | SLC  | MLC  | TLC  | HDD       | RAM      |
|--------------------|--|------|------|-----------|----------|
| P/E cycles         | 100k   | 10k  | 5k   | *         | *        |
| Bits per cell      | 1  | 2    | 3    | *         | *        |
| Seek latency (µs)  | *  | *    | *    | 9000      | *        |
| Read latency (µs)  | 25   | 50   | 100  | 2000-7000 | 0.04-0.1 |
| Write latency (µs) | 250  | 900  | 1500 | 2000-7000 | 0.04-0.1 |
| Erase latency (µs) | 1500   | 3000 | 5000 | *         | *        |
| <i>Notes</i>       | * metric is not applicable for that type of memory   |      |      |           |          |
| <i>Sources</i>     | P/E cycles <a href="#">[20]</a><br>SLC/MLC latencies <a href="#">[1]</a><br>TLC latencies <a href="#">[23]</a><br>Hard disk drive latencies <a href="#">[18, 19, 25]</a><br>RAM latencies <a href="#">[30, 52]</a><br>L1 and L2 cache latencies <a href="#">[52]</a> |      |      |           |          |

Crédit : Micron

La NAND est loin d'être aussi rapide que la mémoire principale, mais elle est plusieurs ordres de grandeur plus rapide qu'un disque dur. Bien que les latences d'écriture soient nettement plus lentes pour la mémoire flash NAND que pour les latences de lecture, elles dépassent toujours les supports rotatifs traditionnels.

Il y a deux choses à noter dans le tableau ci-dessus.

Tout d'abord, notez comment l'ajout de bits supplémentaires par cellule de NAND a un impact significatif sur les performances de la mémoire.

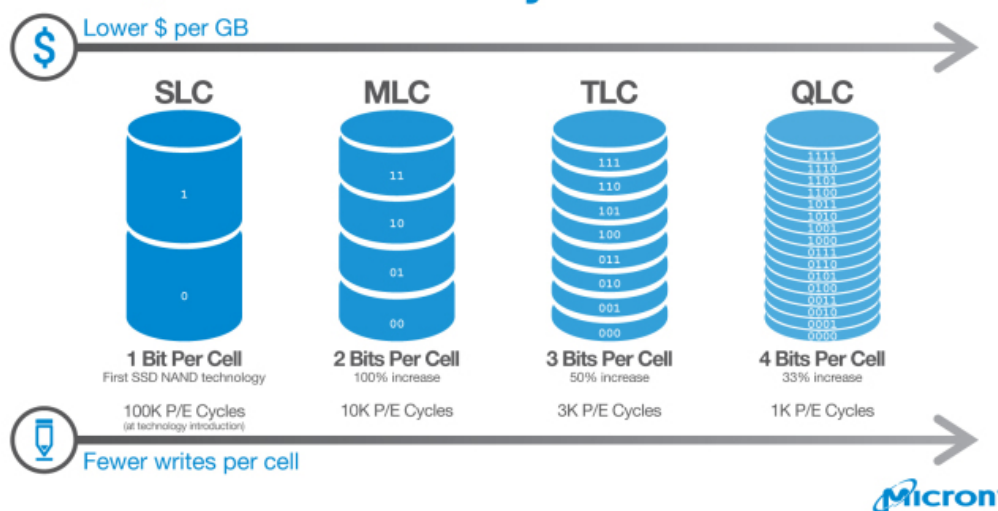
C'est pire pour les écritures que pour les lectures : la latence typique des cellules à trois niveaux (TLC) est 4 fois pire que la NAND à un seul niveau (SLC) pour les lectures, mais 6 fois pire pour les écritures.

Les latences d'effacement sont également considérablement affectées.

L'impact n'est pas proportionnel non plus : la NAND TLC est presque deux fois plus lente que la NAND MLC, bien qu'elle ne contienne que 50 % de données en plus (trois bits par cellule, au lieu de deux).

Cela est également vrai pour les lecteurs QLC, qui stockent encore plus de bits à différents niveaux de tension dans la même cellule.

# QLC = More Density Per NAND Cell



Crédit : Micron

La raison pour laquelle TLC NAND est plus lent que MLC ou SLC est liée à la façon dont les données entrent et sortent de la cellule NAND.

Avec SLC NAND, le contrôleur n'a besoin que de savoir si le bit est un 0 ou un 1.

Avec MLC NAND, la cellule peut avoir quatre valeurs : 00, 01, 10 ou 11.

Avec TLC NAND, la cellule peut avoir huit valeurs, et QLC en a 16.

La lecture de la valeur correcte de la cellule nécessite que le contrôleur de mémoire utilise une tension précise pour déterminer si une cellule particulière est chargée.

## Lectures, écritures et effacement

L'une des limitations [fonctionnelles des SSD](#) est que, bien qu'ils puissent lire et écrire des données très rapidement *sur un lecteur vide*, l'écrasement des données est beaucoup plus lent.

En effet, alors que les SSD lisent les données au niveau de la page (c'est-à-dire à partir de lignes individuelles dans la grille de mémoire NAND) et peuvent écrire au niveau de la page, en supposant que les cellules environnantes sont vides, ils ne peuvent effacer les données qu'au niveau du bloc.

En effet, l'effacement de la mémoire flash NAND nécessite une tension élevée.

Bien que vous puissiez théoriquement effacer la NAND au niveau de la page, la quantité de tension requise sollicite les cellules individuelles autour des cellules en cours de réécriture.

L'effacement des données au niveau du bloc permet d'atténuer ce problème.

La seule façon pour un SSD de mettre à jour une page existante est de copier le contenu du bloc entier en mémoire, d'effacer le bloc, puis d'écrire le contenu de l'ancien bloc + la page mise à jour.

Si le lecteur est plein et qu'il n'y a pas de pages vides disponibles, le SSD doit d'abord rechercher les blocs marqués pour suppression mais qui n'ont pas encore été supprimés, les effacer, puis écrire les données sur la page maintenant effacée.

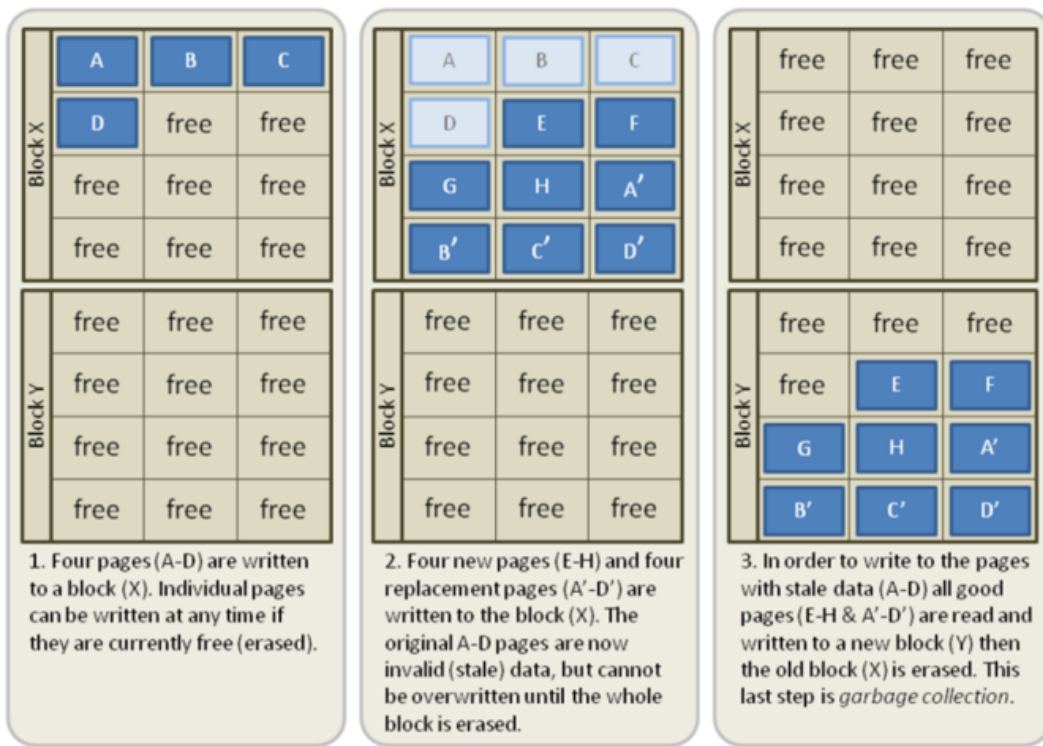
C'est pourquoi les SSD peuvent devenir plus lents à mesure qu'ils vieillissent - un lecteur presque vide est plein de blocs qui peuvent être écrits immédiatement, un lecteur presque plein est plus susceptible d'être forcé à travers toute la séquence programme / effacement.

Si vous avez utilisé des disques SSD, vous avez probablement entendu parler de quelque chose appelé « garbage collection ».

Le nettoyage de la mémoire est un processus en arrière-plan qui permet à un lecteur d'atténuer l'impact sur les performances du cycle programme/effacement en effectuant certaines tâches en arrière-plan.

L'image suivante suit tout au long du processus de nettoyage de la mémoire.





Crédit : Wikipedia

Notez que dans cet exemple, le lecteur a profité du fait qu'il peut écrire très rapidement sur des pages vides en écrivant de nouvelles valeurs pour les quatre premiers blocs (A'-D').

Il a également écrit deux nouveaux blocs, E et H. Les blocs A à D sont maintenant marqués comme périmés, ce qui signifie qu'ils contiennent des informations que le lecteur a marquées comme obsolètes.

Pendant une période d'inactivité, le SSD déplacera les nouvelles pages vers un nouveau bloc, effacera l'ancien bloc et le marquera comme espace libre.

Cela signifie que la prochaine fois que le SSD doit effectuer une écriture, il peut écrire directement sur le bloc X maintenant vide, plutôt que d'effectuer le cycle de programme / effacement.

Le prochain concept dont je veux parler est TRIM.

Lorsque vous supprimez un fichier de [Windows 11](#) sur un disque dur standard, le fichier n'est pas supprimé immédiatement.

Au lieu de cela, le système d'exploitation indique au disque dur qu'il peut écraser la zone physique du disque où ces données ont été stockées la prochaine fois qu'il doit effectuer une écriture.

C'est pourquoi il est possible d'annuler la suppression de fichiers (et pourquoi la suppression de fichiers dans Windows ne libère généralement pas beaucoup d'espace disque physique tant que vous n'avez pas vidé la corbeille).

Avec un disque dur traditionnel, le système d'exploitation n'a pas besoin de faire attention à l'endroit où les données sont écrites ou à l'état relatif des blocs ou des pages.

Avec un SSD, c'est important.

La commande TRIM permet au système d'exploitation d'indiquer au SSD qu'il peut ignorer la réécriture de certaines données la prochaine fois qu'il effectue un effacement de bloc. Cela réduit la quantité totale de données écrites par le disque et augmente la longévité du SSD.

Les lectures et les écritures endommagent la mémoire flash NAND, mais les écritures font beaucoup plus de dégâts que les lectures.

Heureusement, la longévité au niveau des blocs ne s'est pas avérée être un problème dans la mémoire flash NAND moderne.

Plus de données sur la [longévité des SSD](#), gracieuseté du Tech Report, peuvent être trouvées ici.

Les deux derniers concepts dont nous voulons parler sont le nivellement de l'usure et l'amplification de l'écriture.

Étant donné que les SSD écrivent des données sur des pages mais effacent les données en blocs, la quantité de données écrites sur le lecteur est toujours supérieure à la mise à jour réelle.

Si vous apportez une modification à un fichier de 4 Ko, par exemple, le bloc entier dans lequel se trouve le fichier 4K doit être mis à jour et réécrit.

Selon le nombre de pages par bloc et la taille des pages, vous pouvez finir par écrire 4 Mo de données pour mettre à jour un fichier de 4 Ko.

Le nettoyage de la mémoire réduit l'impact de l'amplification d'écriture, tout comme la commande TRIM.

Le maintien d'une partie importante du disque libre et/ou le surprovisionnement du fabricant peuvent également réduire l'impact de l'amplification des écritures.

Le nivellement de l'usure fait référence à la pratique consistant à s'assurer que certains blocs NAND ne sont pas écrits et effacés plus souvent que d'autres.

Bien que le nivellement de l'usure augmente la durée de vie et l'endurance d'un disque en écrivant sur la NAND de manière égale, il peut en fait augmenter l'amplification de l'écriture.

Dans d'autres cas, pour répartir les écritures uniformément sur le disque, il est parfois nécessaire de programmer et d'effacer des blocs même si leur contenu n'a pas réellement changé.

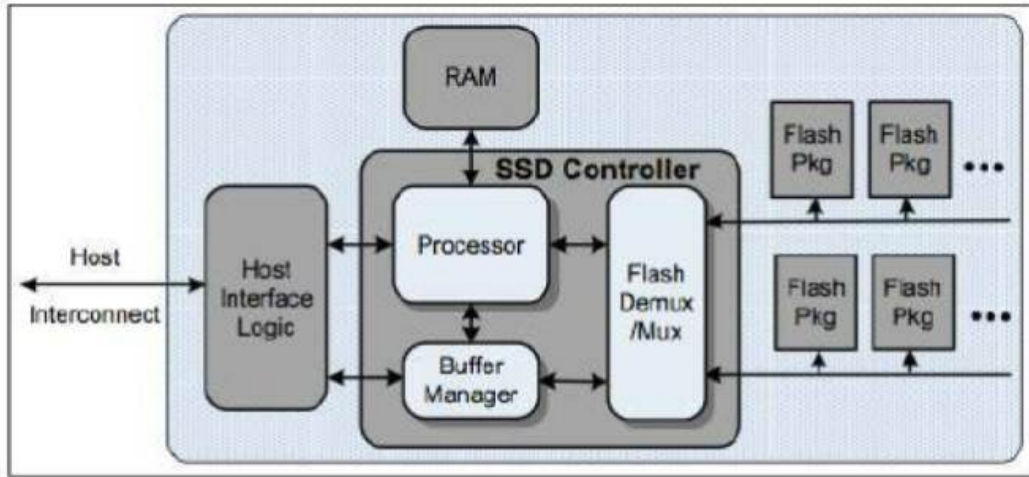
Un bon algorithme de nivellement de l'usure cherche à équilibrer ces impacts.

## Le contrôleur SSD

Il devrait être évident que les SSD nécessitent maintenant des mécanismes de contrôle beaucoup plus sophistiqués que les disques durs. Ce n'est pas pour manquer de respect pour les supports magnétiques - je pense en fait que les disques durs méritent plus de respect qu'on ne leur en donne.

Les défis mécaniques liés à l'équilibrage de plusieurs têtes de lecture-écriture à quelques nanomètres au-dessus de plateaux qui tournent entre 5 400 et 10 000 tr / min ne sont pas à négliger.

Le fait que les disques durs effectuent ce défi tout en étant les pionniers de nouvelles méthodes d'enregistrement sur support magnétique et finissent par vendre des disques à 3-5 cents par gigaoctet est tout simplement incroyable.



SSD Logic Components

Un contrôleur SSD typique Crédit : Inconnu

Les contrôleurs SSD, cependant, sont dans une classe à part.

Ils ont souvent un pool de mémoire DDR3 ou DDR4 pour aider à gérer la NAND elle-même.

De nombreux disques intègrent également des caches de cellules à un seul niveau qui agissent comme des tampons, augmentant les performances des disques en dédiant une NAND rapide aux cycles de lecture/écriture.

Étant donné que la mémoire flash NAND d'un SSD est généralement connectée au contrôleur via une série de canaux de mémoire parallèles, vous pouvez considérer que le contrôleur de disque effectue une partie du même travail d'équilibrage de charge qu'une baie de stockage haut de gamme : les SSD ne déploient pas RAID en interne, mais le nivellement de l'usure, le nettoyage de la mémoire et la gestion du cache SLC ont tous des parallèles dans le grand monde du fer.

Certains lecteurs utilisent également des algorithmes de compression de données pour réduire le nombre total d'écritures et améliorer la durée de vie du lecteur.

Le contrôleur SSD gère la correction d'erreurs, et les algorithmes qui contrôlent les erreurs sur un seul bit sont devenus de plus en plus complexes au fil du temps.

Malheureusement, nous ne pouvons pas entrer dans trop de détails sur les contrôleurs SSD car les entreprises verrouillent leurs différentes saucées secrètes.

Une grande partie des performances de la mémoire flash NAND est déterminée par le contrôleur sous-jacent, et les entreprises ne sont pas disposées à lever le couvercle trop loin sur la façon dont elles font ce qu'elles font, de peur de donner un avantage à un concurrent.

## Interfaces

Au début, les SSD utilisaient des ports SATA, tout comme les disques durs.

Ces dernières années, nous avons assisté à un passage aux disques M.2 - des disques très minces, de plusieurs pouces de long, qui s'insèrent directement dans la carte mère (ou, dans quelques cas, dans un support de montage sur une carte de montage PCIe).

Un lecteur Samsung 970 EVO Plus est illustré ci-dessous.



Crédit : PCMag

## La voie à suivre

La mémoire flash NAND offre une énorme amélioration par rapport aux disques durs, mais elle n'est pas sans inconvénients et défis.

Les capacités des disques et le prix par gigaoctet devraient continuer à augmenter et à baisser respectivement, mais il y a peu de chances que les SSD attrapent les disques durs en prix par gigaoctet.

La réduction des nœuds de processus est un défi important pour la mémoire flash NAND : alors que la plupart du matériel s'améliore à mesure que le nœud rétrécit, la NAND devient plus fragile.

Les temps de rétention des données et les performances d'écriture sont intrinsèquement inférieurs pour la NAND 20 nm que pour la NAND 40 nm, même si la densité de données et la capacité totale sont considérablement améliorées.

Jusqu'à présent, nous avons vu des disques avec jusqu'à 128 couches sur le marché, et plus élevé semble encore plausible à ce stade.

Dans l'ensemble, le passage à la NAND 3D a permis d'améliorer la densité sans réduire les nœuds de processus ni s'appuyer sur une mise à l'échelle planaire.

Jusqu'à présent, les fabricants de SSD ont fourni de meilleures performances en offrant des normes de données plus rapides, plus de bande passante et plus de canaux par contrôleur, ainsi que l'utilisation de caches SLC que nous avons mentionnés précédemment.

Néanmoins, à long terme, on suppose que la NAND sera remplacée par autre chose.

Ce à quoi ressemblera ce quelque chose d'autre est encore ouvert au débat.

La [RAM magnétique](#) et la [mémoire à changement de phase](#) se sont présentées comme candidates, bien que les deux technologies en soient encore à leurs débuts et doivent surmonter des défis importants pour réellement rivaliser en remplacement de la NAND.

La question de savoir si les consommateurs remarqueraient la différence reste ouverte.

Si vous avez mis à niveau d'un disque dur vers un SSD, puis mis à niveau vers un SSD plus rapide, vous savez probablement que l'écart entre les disques durs et les SSD est beaucoup plus grand que l'écart SSD-SSD, même lors de la mise à niveau à partir d'un lecteur relativement modeste.

L'amélioration des temps d'accès de millisecondes à microsecondes est très importante, mais les améliorer de microsecondes à nanosecondes pourrait tomber en dessous de ce que les humains peuvent réellement percevoir dans la plupart des cas.



## Optane se replie sur le marché des entreprises

De 2017 à début 2021, Intel a proposé sa mémoire Optane comme alternative à la mémoire flash NAND sur le marché grand public.

Au début de 2021, la société a annoncé qu'elle [ne vendrait plus de disques Optane dans l'espace grand public, à l'exception](#) du lecteur hybride H20. H20 combine QLC NAND avec un cache Optane pour améliorer les performances globales tout en réduisant les coûts de disque.

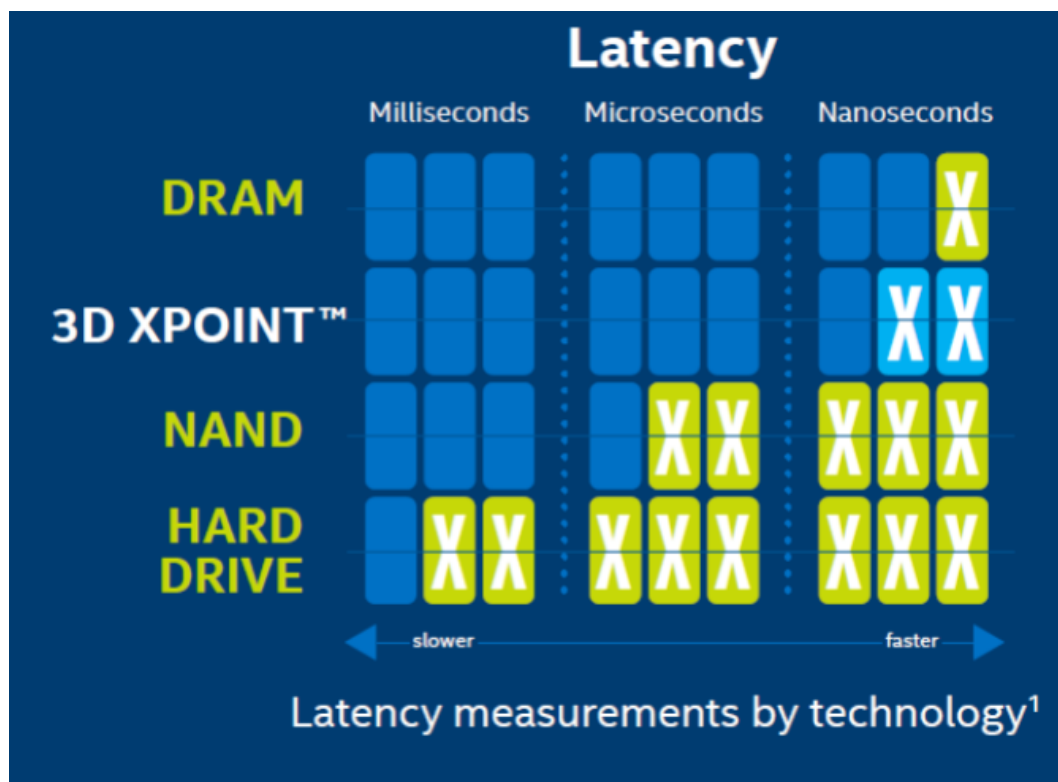
Bien que le H20 soit un produit intéressant et unique, il n'offre pas le même type de performances haut de gamme que les SSD Optane.

Optane restera sur le marché dans le segment des serveurs d'entreprise.

Bien que sa portée soit limitée, c'est toujours la chose la plus proche d'un challenger que la NAND a.

Les SSD Optane n'utilisent pas la NAND - ils sont construits à l'aide d'une mémoire non volatile censée être implémentée de la même manière que la RAM à changement de phase - mais ils offrent des performances séquentielles similaires à celles des lecteurs flash NAND actuels, mais avec de meilleures performances dans les files d'attente de disques faibles.

La latence du disque est également environ la moitié de la mémoire flash NAND (10 microsecondes, contre 20) et une endurance beaucoup plus élevée (30 écritures de disque complet par jour, contre 10 écritures de disque complet par jour pour un SSD Intel haut de gamme).



Objectifs de performance Intel Optane

Crédit : Intel

Optane est disponible en plusieurs formats de disques et en remplacement direct de la DRAM.

Certains processeurs Xeon haut de gamme d'Intel prennent en charge les déploiements Optane de plusieurs téraoctets et prennent en charge un mélange de DRAM et d'Optane qui fournit à un serveur beaucoup plus de RAM que la DRAM seule, au prix de latences d'accès plus élevées.

L'une des raisons pour lesquelles Optane a eu du mal à percer dans l'espace grand public est que les prix de la NAND ont chuté de façon spectaculaire en 2019 et sont restés bas jusqu'en 2020, ce qui rend difficile pour Intel de concurrencer efficacement.

Consultez notre série [ExtremeTech Explains](#) pour une couverture plus approfondie des sujets technologiques les plus chauds d'aujourd'hui.

**EXTREMETECH**

[Stockage Extremetech explique Stockage SSD NAND Flash SSD](#)

Recherche et mise en page:

*Michel Cloutier*

*CIVBDL*

*20230716*

*"C'est ensemble qu'on avance"*