

Comment choisir la mémoire vive

Table des matières

Objectifs	2
Introduction	2
Les principales caractéristiques de la mémoire vive	2
Type et facteur d'encombrement	2
Capacité	3
Que se passe-t-il quand on n'a pas assez de RAM?	4
Fréquence, débit, vitesse et latence	5
MHz ou MT/s?	5
Débit vs Vitesse	5
Latence (timings)	6
Ai-je besoin d'une mémoire plus rapide?	6
Standards du JEDEC et XMP	7
Canaux	7
ECC	8
Mémoire à registres (RDIMM)	8
Voltage	9
Éclairage au LED	9
Compatibilité	9
Comparer les caractéristiques	9
Et donc, comment choisit-on la mémoire vive?	9
Références	10



Objectifs

- Comprendre les principales caractéristiques de la mémoire vive et leurs impacts sur la performance
- Pouvoir comparer des barrettes de mémoire vive
- Être en mesure de faire un choix éclairé de la mémoire vive selon ses besoins

Introduction

Nous avons vu au chapitre précédent qu'un processeur permet d'exécuter des programmes informatiques, sous forme d'instructions machine. Les instructions qui composent un programme sont habituellement récupérées à partir de fichiers conservés sur un support de stockage. Cela dit, lors de l'exécution d'un programme, le processeur ne lit pas ces instructions directement sur un support de stockage, car cela serait beaucoup trop lent. De plus, un programme manipule aussi des données. Il faut bien placer ces données quelque part!

La mémoire vive, encore une fois beaucoup plus rapide qu'un support de stockage, est l'endroit tout désigné pour conserver – de manière temporaire, puisqu'il s'agit d'une mémoire volatile – les instructions et les données des programmes en cours d'exécution. Cela en fait donc un composant essentiel de tout ordinateur, qu'il est indispensable de savoir choisir correctement.

Vous connaissez déjà les caractéristiques les plus importantes de la mémoire vive, puisque vous les avez vues dans le cours *Initiation à la gestion d'un ordinateur*. Dans ce chapitre, nous allons aller un peu plus loin sur certaines de ces caractéristiques, et en explorer d'autres, et nous allons élaborer davantage sur la prise en compte de ces caractéristiques dans le choix de la mémoire vive pour un ordinateur.

Les principales caractéristiques de la mémoire vive

Type et facteur d'encombrement

Le type d'une barrette de mémoire vive désigne la technologie de RAM utilisée par celle-ci, par exemple **DDR4** ou **DDR5** (pour rappel, « DDR » signifie « *Double Data Rate* »). La barrette doit être compatible avec la carte mère et le processeur utilisés. On trouve des processeurs x86 compatibles avec la mémoire DDR5 depuis la 12^e génération des processeurs *Intel Core* et la série 7000 des processeurs *AMD Ryzen*.

En principe, une mémoire d'une génération DDR plus récente devrait être plus performante qu'une mémoire d'une génération plus ancienne. Cela dit, à l'heure actuelle le gain de performance réel de la

mémoire DDR5 par rapport à la mémoire DDR4 n'est pas toujours énorme et dépend beaucoup des mémoires spécifiques comparées et du type de tâches effectué. La mémoire DDR5 est aussi souvent plus chère que la mémoire DDR4, mais l'écart s'est beaucoup rétréci. Dans tous les cas, il est certain que la mémoire DDR5 est davantage à l'abri du vieillissement (« *future-proof* ») que la mémoire DDR4, et supporte une capacité de mémoire maximale par barrette qui est supérieure. Il n'y a par ailleurs aujourd'hui aucune bonne raison de choisir une génération DDR plus ancienne que DDR4 (ex : DDR3), sauf si on met à jour un ordinateur ancien qui utilise un tel type de mémoire.

Lors de l'achat d'une barrette de mémoire vive, il faut aussi porter attention à son facteur d'encombrement : **DIMM** (« *Dual Inline Memory Module* ») pour une tour ou **SO-DIMM** (pour « *Small Outline DIMM* », parfois orthographié « *SODIMM* ») pour un portable. On trouve aussi des barrettes SO-DIMM dans certains appareils compacts d'autres types, tels que des mini-PC, des imprimantes, des routeurs, etc. Le type de connecteur utilisé sur la carte mère pour y insérer une barrette de RAM est quant à lui déterminé à la fois par le type de la mémoire et son facteur d'encombrement.

Dans les appareils mobiles, on trouve souvent de la mémoire de type **LPDDR** (par exemple, LPDDR4 ou LPDDR5), les lettres « LP » signifiant « *Low Power* ». La mémoire de ce type est habituellement soudée directement à la carte mère, et n'est donc pas au format DIMM ou SO-DIMM. Certains ordinateurs portables utilisent ce type de mémoire également, il faut donc savoir lorsqu'on achète un tel portable qu'on ne pourra fort probablement pas remplacer sa RAM.

Finalement, on trouve aussi de la mémoire vive sur les cartes graphiques, généralement de type **GDDR** (pour « *Graphics DDR* »). La génération GDDR la plus récente qu'on trouve sur le marché en ce moment est GDDR6 (et sa variante GDDR6X), et on devrait voir apparaître la GDDR7 bientôt¹.

Capacité

La capacité de la mémoire vive est exprimée en Go et représente la quantité maximale de données qui peuvent être présentes en mémoire vive à tout moment. La « règle du pouce » suivante peut nous guider dans le choix de la capacité de mémoire vive dont on a besoin sur un ordinateur personnel² :

- **4 Go** : Insuffisant pour la plupart des gens
 - Au repos, Windows 11 utilise environ 3 Go de RAM³
 - Peut être suffisant pour une machine peu puissante destinée uniquement à des tâches simples, tel qu'un Chromebook
 - Plus viable sur Linux que sur Windows
- **8 Go** : De moins en moins suffisant

1 <https://www.tomshardware.com/pc-components/gpus/what-is-gddr7-memory>

2 <https://www.digitaltrends.com/computing/how-much-ram-do-you-need/>

3 <https://windowsreport.com/does-windows-11-consume-more-ram/#how-much-ram-does-windows-11-use-when-idle>

- Peut être suffisant pour des tâches de bureautique simple, mais moins viable si on doit travailler sur des documents volumineux ou faire beaucoup de multitâche
- Même pour la navigation Web, peut devenir insuffisant si on a l'habitude d'avoir beaucoup d'onglets ouverts en même temps
- **16 Go** : Suffisant pour la plupart des gens
 - Bureautique, navigation Web, jeux vidéo
 - Multitâche
 - Développement logiciel
- **32 Go et plus** : Pour les cas d'utilisation plus gourmands
 - Certaines tâches d'édition de photos et vidéos, surtout en 4K et plus
 - Certaines tâches de développement, surtout lorsqu'on doit exécuter plusieurs logiciels gourmands simultanément (ex : serveurs de développement)
 - Peut être un bon investissement si on doit régulièrement utiliser des machines virtuelles
 - Peut être bénéfique pour certains jeux vidéo récents, surtout en 4K
 - Certaines applications en ingénierie et en sciences peuvent nécessiter beaucoup plus que 32 Go de RAM (voire 256 Go!)

Si on n'est pas certain de la quantité de mémoire vive dont on a besoin, le mieux est de se renseigner sur les logiciels qu'on prévoit d'utiliser. En faisant cela, il faut prendre en compte les applications qu'on aura besoin d'exécuter en simultané. Par exemple, un développeur logiciel pourrait devoir utiliser en même temps un IDE, un serveur local de développement, un serveur de bases de données, un navigateur Web, un émulateur Android, une application pour écouter de la musique, etc. Il faut par ailleurs penser aux besoins du système d'exploitation! Bien entendu, il ne faut pas oublier que le processeur a une limite de capacité de RAM supportée, et que la carte mère a un nombre fini de connecteurs disponibles pour la mémoire vive. N'oublions pas non plus qu'il est généralement possible d'ajouter plus de mémoire vive à son ordinateur plus tard, et que le prix par Go pour la dernière génération de mémoire risque de continuer de diminuer!

Dans le futur, les barrettes DDR5 pourront offrir des capacités maximales plus élevées, voire beaucoup plus élevées que les barrettes DDR4 actuelles, grâce à une augmentation de la densité de stockage avec ce standard.

Que se passe-t-il quand on n'a pas assez de RAM?

Lorsque les programmes en cours d'exécution sur notre appareil demandent plus de mémoire vive que l'ordinateur en possède, le système d'exploitation doit commencer à échanger des données entre la mémoire vive et le support de stockage. On appelle ce processus le **paging** ou **swapping**, car ce sont des « pages » de mémoire qui sont ainsi échangées (« *swapped* »). L'espace de stockage dédié au

paging est appelé « **espace d'échange** » ou « *swap space* ». Les pages qui y sont stockées sont inactives, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas utilisées par un processus à ce moment. Elles doivent cependant être rechargées en mémoire lorsqu'elles redeviennent actives – en les échangeant au besoin avec des pages inactives.

Naturellement, puisque le support de stockage est infiniment plus lent que la mémoire vive, le *swapping* résulte en une perte de performance significative. En revanche, si l'ordinateur possède suffisamment de mémoire vive pour couvrir toutes les utilisations qu'on en fait, alors il n'y aura presque jamais de *swapping* et l'ordinateur sera donc plus rapide. Il ne sert cependant à rien d'avoir trop de mémoire vive : si on a 16 Go de RAM et qu'on ne dépasse jamais cette capacité, cela signifie qu'on n'utilise jamais l'espace d'échange, et donc ajouter encore plus de RAM ne rendra pas l'ordinateur plus rapide.

Fréquence, débit, vitesse et latence

La **fréquence** de la mémoire vive s'exprime en MHz et correspond à sa vitesse d'horloge. La fréquence maximale pouvant être utilisée est cependant limitée par le CPU et la carte mère. Par ailleurs, si on mélange des barrettes de fréquences différentes, toutes les barrettes fonctionneront à la fréquence la plus basse utilisée.

Plus une génération de mémoire vive est récente, plus les fréquences possibles pour les barrettes de cette génération sont élevées. Par exemple, DDR5 permet des fréquences plus élevées que DDR4.

MHz ou MT/s?

Vous verrez parfois l'unité **MT/s** (Mégatransferts par seconde) apparaître dans les spécifications techniques d'un module de mémoire vive. Cette unité fait référence au **débit** de la mémoire vive. Le débit est toujours le double de la fréquence. Cela s'explique par la technologie DDR, qui signifie « *Double Data Rate* » : à chaque cycle d'horloge de la mémoire vive, deux transferts de données sont effectués.

Il arrive qu'une fiche de vente affiche une fréquence en MHz alors que le nombre indiqué correspond plutôt au débit, et devrait donc être exprimé en MT/s. Par exemple, lorsqu'une barrette de mémoire DDR4 annonce une fréquence de 2666 MHz, elle a en réalité une fréquence de 1333 MHz et un débit de 2666 MT/s.

Dans le nom d'un module de mémoire vive, on voit parfois le type de mémoire utilisé suivi d'un tiret et d'un nombre, par exemple *DDR4-2400*. Dans cet exemple, on a affaire à une mémoire DDR4 avec un débit de 2400 MT/s, et donc une fréquence de 1200 MHz.

Débit vs Vitesse

Les modules de mémoire DDR4 et DDR5 transfèrent des données d'une taille de 8 octets (64 bits) à la fois. La **vitesse** maximale d'une mémoire DDR4 ou DDR5 en Mo/s correspond donc à 8 fois son débit. Par exemple, une mémoire DDR4-2400 a une vitesse de 19 200 Mo/s. Dans la fiche de vente d'une telle

mémoire, on trouvera parfois l'expression « PC4-19200 », qui signifie donc « Mémoire DDR4 avec une vitesse de 19 200 Mo/s (le nombre est souvent arrondi vers le bas, par exemple pour une mémoire de 2933 MT/s on indiquera PC4-23400).

Latence (*timings*)

Si le débit de la mémoire vive donne une indication de la quantité de données qu'elle peut envoyer et recevoir chaque seconde, la **latence**, pour sa part, donne une indication du délai entre les opérations. Elle est indiquée par des **timings** qui sont exprimés par 4 valeurs qui correspondent à des nombres de cycles d'horloge. Voici un exemple de *timings* :

15 – 16 – 16 – 35

La première valeur (15) correspond à la **CAS Latency** (parfois abrégé **CL**). Il s'agit du nombre de cycles d'horloge avant que la RAM puisse commencer à répondre à une requête pour des données.

La deuxième valeur (16) indique le **Row Address to Column Address Delay (tRCD)**. Sachant que la RAM est organisée sous forme de matrice, il s'agit du délai entre l'accès à une ligne (*row*) de la mémoire et l'accès à la colonne (*column*) voulue.

La troisième valeur (16) constitue le **Row pre-charge time (tRP)**, soit le délai nécessaire pour désactiver l'accès à une ligne et activer ensuite l'accès à une autre ligne.

Finalement, la quatrième valeur (35) est le **Row Active Time (tRAS)**, qui représente le nombre maximum de cycles d'horloge pour lesquels une ligne doit demeurer active afin que les données soient lues ou écrites correctement.

La première valeur (*CAS Latency*) est la plus importante. C'est celle qu'on utilise pour calculer la **latence réelle** de la RAM, exprimée en nanosecondes. Puisque les *timings* sont exprimés en nombre de cycles d'horloge, il faut prendre en compte le débit en MT/s (ou la fréquence en MHz, qu'il faut alors multiplier par 2) pour effectuer ce calcul. La formule est la suivante :

$$\text{Latence} = (\text{CAS Latency} / \text{Débit}) * 2000$$

Par exemple, pour une mémoire DDR4-1866 avec un *CAS Latency* de 13 :

$$\text{Latence} = (13 / 1866) * 2000 = 13,93 \text{ nanosecondes}$$

La latence est une valeur qu'on cherche à minimiser. À débits égaux, des *timings* moins élevés sont donc préférables. À débits différents, il faut effectuer le calcul pour savoir quel module de mémoire a la latence la plus faible. La page Web suivante permet d'effectuer ce calcul automatiquement pour comparer jusqu'à 3 modules de mémoire à la fois : <https://notkyon.moe/ram-latency2.htm>

Ai-je besoin d'une mémoire plus rapide?

Pour la plupart des applications, le débit et les *timings* de la RAM ont un impact marginal sur la performance. Un impact plus visible est possible pour d'autres applications, par exemple :

- Les logiciels de compression (ex : 7-Zip)
- Certains jeux vidéo
- Certaines fonctionnalités des logiciels de création multimédia

Pour savoir si on bénéficierait d'une mémoire plus rapide, le mieux est de faire des recherches sur les logiciels qu'on prévoit utiliser régulièrement, ou consulter des bancs d'essai en situation réelle testant les logiciels en question avec des mémoires de différentes vitesses. Par ailleurs, les impacts d'une mémoire plus rapide sont plus visibles si on utilise un GPU intégré au CPU (donc si on n'a pas de carte graphique dédiée, puisque la mémoire vive est alors utilisée comme mémoire vidéo). Cependant, il est souvent plus avantageux d'investir dans un meilleur CPU ou un meilleur GPU plutôt que dans une RAM plus rapide.

Standards du JEDEC et XMP

Une organisation appelée **JEDEC** fixe les standards concernant les débits possibles pour la mémoire vive selon son type, ainsi que les *timings* possibles pour chaque débit. Par exemple, à l'heure actuelle, aucune mémoire DDR4 ne peut avoir un débit supérieur à 3200 MT/s selon le JEDEC. On peut pourtant acheter de la mémoire DDR4 avec un débit jusqu'à 5333 MT/s! Comment cela est-il possible?

Toute combinaison de débit et de *timings* qui sortent des standards du JEDEC est, par définition, du surcadencement (*overclocking*). Lorsqu'on achète de la RAM dont les spécifications sortent des standards, celles-ci correspondent à un niveau d'*overclocking* approuvé par le fabricant. Par défaut, la fréquence d'opération de la RAM une fois installée sera plus basse que celle annoncée, en respect des standards. Par exemple, une RAM avec un débit annoncé de 5333 MT/s pourrait en fait avoir un débit de 3200 MT/s une fois installée, si on ne change pas les paramètres appropriés dans le BIOS. Pour corriger cela, il faut charger ce qu'on appelle un « profil **XMP** » (pour *Extreme Memory Profile*) à partir du BIOS. Cela aura pour effet de configurer la RAM aux débits et aux *timings* approuvés par le fabricant. Il faut cependant que la mémoire vive et la carte mère soient compatibles avec XMP (ou son équivalent appelé AMP pour les processeurs AMD, puisque XMP est une technologie d'Intel). De plus, même si la carte mère supporte XMP, il est toujours possible qu'elle limite le débit maximal pouvant être utilisé.

Canaux

La plupart des CPU actuels possèdent plusieurs canaux (interfaces) de communication avec la mémoire vive afin d'accélérer le transfert de données entre celle-ci et le CPU. Sur les processeurs de PC, on parle généralement de « **dual-channel** », c'est-à-dire qu'il y a deux canaux – le terme plus général pour cette technologie étant « **multi-channel** ». Pour pouvoir utiliser plusieurs canaux, il faut aussi que cela soit supporté par la carte mère – ce support est généralement identifiable par la présence de groupes de connecteurs de mémoire vive de même couleur sur la carte mère.

Pour profiter du « *multi-channel* », il faut placer des barrettes de RAM idéalement identiques dans le même groupe de connecteurs. C'est pourquoi les barrettes sont souvent vendues en paires (pour le

« *dual-channel* »). Il y a donc un gain de performance à avoir 2 barrettes plutôt qu'une seule, même si la capacité totale est la même (par exemple : 2 barrettes de 8 Go seront plus performantes qu'une seule barrette de 16 Go si on les installe en « *dual-channel* »).

Il est à noter qu'avec la mémoire DDR5, chaque barrette offre deux canaux à elle seule. Ce sont cependant deux canaux de 32 bits alors que DDR4 utilise un seul canal de 64 bits par barrette. La taille totale de l'interface avec le CPU est donc la même, mais la division en deux canaux pour DDR5 apporte néanmoins un certain gain de performance. Certaines sources considèrent qu'avoir deux barrettes de DDR5 dans une paire de connecteurs signifie qu'on a du « *quad-channel* », tandis que d'autres estiment qu'il s'agit quand même simplement de « *dual-channel* ».

ECC

La mémoire à **ECC** (*Error Correcting Code*, soit « Code correcteur d'erreurs) stocke des données supplémentaires permettant de détecter lorsqu'un bit change de valeur inopinément. Le code correcteur permet également de corriger certaines erreurs, ce qui peut éviter des plantages. Une explication détaillée du principe de fonctionnement de cette technologie est disponible ici :

<https://youtu.be/ldhQ0a9-oKs>

La mémoire à ECC coûte plus cher, mais est également beaucoup plus fiable que la mémoire sans ECC. Elle nécessite par ailleurs un processeur et un *chipset* compatibles avec cette technologie. On trouve la mémoire à ECC principalement dans les serveurs.

La mémoire DDR5 possède d'emblée une certaine capacité de correction des erreurs. Celle-ci est cependant différente de la technologie ECC, et permet seulement de corriger certaines erreurs qui surviennent sur la barrette de RAM elle-même, tandis qu'ECC peut également détecter et corriger les erreurs qui ont lieu lors du transport des données entre la RAM et le CPU.

Mémoire à registres (RDIMM)

La **mémoire vive à registres** (« *registered memory* » ou « **RDIMM** » pour « *Registered DIMM* », aussi appelée « *buffered memory* ») est une mémoire à laquelle on a ajouté des registres ou « *buffers* » servant d'intermédiaire entre le contrôleur de mémoire du CPU et les puces DRAM (qui contiennent les données). Cela a pour effet de réduire la charge sur les puces DRAM et d'augmenter la stabilité du contrôleur de mémoire, ce qui permet d'avoir des barrettes de RAM de capacité beaucoup plus grande. Par conséquent, comme pour la mémoire à ECC, on trouve surtout ce type de mémoire dans les serveurs – il est d'ailleurs fréquent que les barrettes de mémoire pour serveur soient à la fois ECC et à registres.

Pour pouvoir utiliser de la mémoire à registres, il faut posséder un processeur et une carte mère compatibles. Les barrettes de mémoires qui ne sont pas à registres sont parfois appelées **UDIMM** (pour « *Unbuffered DIMM* »), qui est simplement un synonyme de DIMM.

Voltage

Le voltage fait partie des spécifications affichées dans les spécifications des barrettes de RAM. Une RAM avec un voltage non standard peut causer des problèmes. Il est donc toujours préférable de vérifier les voltages supportés par la carte mère. Cette caractéristique est surtout à considérer si on veut surcadencer (« overclocker ») la RAM.

Éclairage au LED

Certaines barrettes de mémoire vive possèdent des lumières LED dont on peut parfois même personnaliser la couleur. Cela n'a bien entendu aucun impact sur la performance de la RAM (malgré les blagues que votre enseignant peut faire en classe sur le sujet), mais peut offrir un aspect esthétique intéressant si le boîtier de l'ordinateur a un panneau transparent.

Compatibilité

Bien que rares, des problèmes de compatibilité autres que ceux déjà mentionnés peuvent survenir. Les fabricants de cartes mères possèdent souvent une liste de mémoires compatibles (*QVL* pour *Qualified Vendors List*). Une mémoire non listée peut tout de même fonctionner, mais n'a pas été testée par le fabricant. Il ne faut pas non plus oublier que le processeur a des limites au niveau de la capacité et la fréquence de mémoire vive supportées, et que la carte mère a un nombre limité de connecteurs DIMM ou SO-DIMM.

Comparer les caractéristiques

Même avec toutes les caractéristiques que nous venons de voir, il demeure que lorsqu'on compare les mémoires vives de deux ordinateurs, la capacité de la mémoire vive demeure l'aspect le plus important à considérer. Si un ordinateur a seulement 8 Go de RAM (ce qui est probablement insuffisant) et qu'un autre en a 16, on s'intéressera moins au type de mémoire de chacun, et encore moins aux débits et aux *timings*. Cela étant dit, il faut aussi garder en tête qu'il est inutile d'avoir « trop » de mémoire vive. Il est donc essentiel d'avoir une bonne idée de la quantité de mémoire vive dont nous avons réellement besoin. On s'intéresse aux autres caractéristiques seulement lorsque ce besoin est couvert.

Et donc, comment choisit-on la mémoire vive?

Pour choisir la mémoire vive, on doit suivre les étapes suivantes :

Étape 1 : Établir les besoins

- Déterminer la quantité de mémoire dont on a besoin;
- Identifier le type voulu (probablement DDR4 ou DDR5) et le facteur d'encombrement (DIMM pour une tour et SO-DIMM pour un portable, sauf exceptions) nécessaire;
- Déterminer si une RAM plus rapide serait avantageuse pour nos besoins.

Étape 2 : Identifier les produits qui répondent aux besoins

On identifie les modules de mémoire disponibles avec les caractéristiques voulues, et on valide la compatibilité de ceux-ci avec les autres composants.

Étape 3 : Sélectionner un produit parmi ceux identifiés

Comme pour le processeur, on peut s'aider en consultant des avis d'experts et des comparatifs ou bancs d'essai au besoin. Comme toujours, on doit aussi prendre en compte son budget!

Références

- <https://www.tomshardware.com/reviews/memory-buying-guide,6347.html>
- <https://www.tomshardware.com/reviews/how-much-ram-memory,6092.html>
- <https://www.tomshardware.com/reviews/pc-memory-ram-frequency-timings,6328.html>
- <https://www.techsiting.com/mt-s-vs-mhz/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=kUFWalEf31w>
- <https://www.youtube.com/watch?v=mkpCvaBBo-c>
- <https://www.youtube.com/watch?v=Yed-a9vqTYc>
- <https://www.youtube.com/watch?v=h-TWQ0rS-SI>
- https://www.youtube.com/watch?v=D_Yt4vSZKVK
- <https://www.crucial.com/support/articles-faq-memory/what-is-xmp>
- https://en.wikipedia.org/wiki/DDR4_SDRAM#JEDEC_standard_DDR4_module
- <https://www.intel.ca/content/www/ca/fr/gaming/extreme-memory-profile-xmp.html>
- https://www.reddit.com/r/buildapc/comments/8x79ob/what_does_xmp_mean_in_bios_setting/
- <https://evansblog.thebarrs.info/2019/04/ram-latency-vs-clock-speed.html>
- <https://itigic.com/what-is-qvl-of-motherboards-what-is-it-for/>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/SO-DIMM>
- <https://www.eatyourbytes.com/fr/debit-vitesse-latences-et-voltage-des-memoires-ram-ddr4/>
- <https://www.techreviewer.com/learn-about-tech/how-to-choose-ram/>
- <https://www.windowscentral.com/ddr4-vs-ddr5>
- <https://www.tomshardware.com/features/ddr5-vs-ddr4-is-it-time-to-upgrade-your-ram>
- <https://windowsreport.com/does-windows-11-consume-more-ram/>

- <https://www.laptopmag.com/articles/how-much-ram>
- <https://www.techreviewer.com/tech-answers/how-much-memory-for-programming/>
- <https://www.videogamer.com/tech/memory/is-32gb-ram-overkill-for-gaming/>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/LPDDR>
- <https://www.kingston.com/en/blog/pc-performance/ddr5-overview>
- <https://www.intel.com/content/www/us/en/content-details/754991/ecc-memory-vs-ddr5-built-in-data-checking-infographic.html>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9moire_vive_%C3%A0_registres
- <https://www.youtube.com/watch?v=NOyhtiFU1lw>
- <https://community.fs.com/fr/blog/dimm-types-udimm-vs-rdimm-vs-lrdimm.html>
- <https://www.tomshardware.com/news/samsung-develops-worlds-first-gddr7-chip>
- <https://www.crucial.com/articles/about-memory/what-is-dual-channel-memory>
- <https://www.youtube.com/watch?v=b-WFetQjifc>
- <https://www.digitaltrends.com/computing/ddr5-vs-dd4-memory/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=1oXbUIQsN08>
- <https://www.tomshardware.com/pc-components/gpus/what-is-gddr7-memory>
- <https://www.digitaltrends.com/computing/how-much-ram-do-you-need/>