

Tendances technologiques

3D Xpoint

Version 0.2
Date 2019-10-15



Shared Services
Canada

Services partagés
Canada

Canada

Table des matières

Sommaire opérationnel	3
Sommaire technique.....	4
Utilisation au sein de l'industrie.....	5
Utilisation par le gouvernement du Canada.....	6
Répercussions pour Services partagés Canada (SPC).....	7
Proposition de valeur	7
Difficultés.....	Error! Bookmark not defined.
Considérations	11
Références	12

Sommaire opérationnel

3D Xpoint (prononcé, en anglais, *three dee crosspoint*) est un nouveau type de mémoire non volatile conçu et distribué conjointement par Intel et Micron Technology Inc. en 2015. Les deux entreprises ont mis fin à leur collaboration opérationnelle et chacune exploite ses propres produits, marques et marchés particuliers : Optane dans le cas d'Intel et QuantX dans le cas de Micron.

Pour bien comprendre la 3D Xpoint, il faut savoir ce qu'est une mémoire informatique. On entend par « mémoire » les données ou renseignements, souvent en format binaire, qu'une machine ou technologie peut lire et utiliser. On retrouve divers types de mémoire dans les ordinateurs et dispositifs conventionnels. Ils sont fondés sur les conceptions complexes distinctes du matériel sous-jacent¹. La mémoire peut être volatile (non permanente) ou non volatile (permanente).

La mémoire volatile (ou temporaire) a besoin d'une alimentation continue pour conserver les données ou renseignements stockés. Si on éteint l'ordinateur, le contenu de la mémoire volatile est perdu². Une mémoire vive (RAM) est volatile (il y a des exceptions, comment la mémoire vive CMOS utilisée dans les BIOS). La mémoire vive sert normalement de stockage primaire ou principal dans des systèmes informatiques. Puisque le stockage principal doit être très rapide, il utilise généralement une mémoire vive. Compte tenu du caractère temporaire de la mémoire vive, les utilisateurs doivent fréquemment sauvegarder leur travail sur un support non volatile (permanent), comme un disque dur, pour éviter la perte de données³.

La mémoire (ou stockage) non volatile (NVM) est un type de mémoire informatique qui conserve les données même lorsque l'ordinateur est éteint. Contrairement à la mémoire volatile, elle n'a pas besoin d'être périodiquement rafraîchie. On s'en sert généralement pour le stockage secondaire ou à long terme⁴. On utilise la mémoire non volatile, par exemple, pour les supports numériques et les puces de mémoire pour les clés USB et les caméras numériques. La mémoire non volatile élimine le besoin de types de stockage secondaires plus lents comme les disques durs⁵.

La technologie 3D Xpoint comble une lacune sur le marché du stockage entre deux types de mémoire. Le premier type est une forme de mémoire vive (RAM) nommée DRAM (mémoire vive dynamique), qui est volatile et sert normalement pour le code informatique et les données dont a besoin l'unité de traitement. La mémoire vive permet à un ordinateur d'effectuer efficacement plus d'une tâche à la fois (multitâche).

Le second type est la mémoire flash NAND, qui n'est pas volatile et n'a pas besoin d'alimentation pour conserver les données. L'objectif est de réduire de coût par bit et d'accroître la capacité pour permettre à la mémoire flash de concurrencer les dispositifs de stockage magnétiques (p. ex., disques durs). La mémoire flash NAND permet la commercialisation de dispositifs qui chargent et remplacent souvent des

fichiers de grande taille, par exemple, les lecteurs MP3, les caméras numériques et les clés USB⁶.

La 3D Xpoint offre la non-volatilité de la technologie NAND et la faible latence de la DRAM. Un dispositif 3D Xpoint peut donc conserver les données mêmes si l'alimentation est coupée ou l'ordinateur est redémarré, mais offre la vitesse de la DRAM et une latence comparable à celle de la technologie flash.

En bref, 3D Xpoint veut combiner les avantages des mémoires flash DRAM et NAND et éviter leurs limitations. La technologie présente des attributs uniques. Comme les autres types de puces RAM, elle est adressable au niveau de l'octet et peut donc servir de mémoire principale ou comme mémoire RAM secondaire. Puisqu'il s'agit d'une mémoire non volatile, elle peut aussi remplacer un disque dur ou un disque électronique (SSD)⁷.

Sommaire technique

<https://searchstorage.techtarget.com/definition/3D-XPoint>

<https://www.electronicdesign.com/embedded-revolution/intel-winds-down-3d-xpoint-development-micron>

L'objectif pour la technologie 3D Xpoint est d'éliminer l'écart entre les mémoires (SRAM DRAM) et le stockage (NAND, SSD, disque dur) au moyen d'une solution intermédiaire. Même s'il s'agit d'une technologie récente, les études démontrent qu'elle offre une bonne performance. Des tests démontrent une performance de 2 000 Mo par seconde en lecture séquentielle et de 900 Mo par seconde pour l'écriture séquentielle, ce qui n'est pas beaucoup plus rapide qu'un SSD NAND. Par contre, la technologie se distingue grâce à une faible latence d'environ 10 μs , soit 100 fois plus lent que la DRAM, mais 1 000 fois plus rapide qu'un SSD NAND. (Malventano, 2017) Par conséquent, le système continue de répondre aux besoins même lorsqu'il est chargé, puisque l'unité centrale ne perd pas de temps à attendre des données de la mémoire et peut donc fonctionner plus efficacement. (Gangam, 2018) De plus, les caractéristiques de la 3D Xpoint permettent d'améliorer l'endurance et la fiabilité à long terme. On peut récrire jusqu'à 20 000 cycles de données sans dégradation, contrairement à de 1 000 à 3 000 cycles pour un SSD NAND traditionnel. De plus, la technologie SSD NAND stocke les données au moyen de charges électriques dans les cellules, mais il y a une lente perte d'énergie qui, à long terme, entraîne la perte de données. Par conséquent, cette technologie ne convient pas pour l'archivage à long terme. (Wikipedia, 2019) La 3D Xpoint élimine toutefois le besoin de remplacer le support de stockage, puis qu'un matériau à changement de phase (MCP) maintient son état atomique avec ou sans alimentation.

Le nom « 3D Xpoint » provient de son architecture : une matrice empilable à grille croisée pour l'accès aux données. Des colonnes submicroscopiques de sélecteurs et

de cellules de mémoire sont maillées à l'intersection de fils perpendiculaires. On peut adresser chaque cellule individuellement au moyen d'un courant dans les fils supérieurs et inférieurs correspondants. La conception permet de superposer plusieurs couches dans une structure tridimensionnelle pour améliorer l'extensivité. On signale qu'Intel obtient une densité de stockage de 8 à 10 fois supérieure à celle de la DRAM. (Jain, 2018)

La technologie 3D XPoint est fondée sur des matériaux à changement de phase (MCP). La composition des circuits n'est pas précisée, mais il pourrait s'agir d'alliages à changement de phase à base de germanium, d'antimoine et de tellure. Ces métalloïdes ont des propriétés physiques qui permettent de multiples états stables avec des caractéristiques de résistance distinctes. Le sélecteur d'une cellule peut vérifier une opération de modification et appliquer le voltage approprié pour modifier la structure atomique du matériau (isolant amorphe ou conducteur cristallin). Chaque niveau de résistance correspond à la valeur « 0 » ou « 1 », et le matériau retient cette valeur indéfiniment. La perte d'alimentation ne modifie donc pas le contenu de la mémoire, puisque celle-ci n'utilise pas du silicium pour créer des transistors énergivores (comme dans le cas de la DRAM). De plus, il n'est pas nécessaire d'effacer le contenu d'une cellule, puisque la nouvelle valeur peut être écrite quelle que soit la valeur précédente. Dans la technologie flash NAND, par contre, les données sont stockées en blocs de 4 kb qui doivent être effacés avant l'écriture de nouvelles données. En théorie, la 3D Xpoint offre donc une meilleure performance et une consommation réduite. (Malventano, 2017)

Utilisation au sein de l'industrie

Les besoins en matière de performance et de rentabilité ont motivé le développement d'une solution de remplacement des mémoires flash DRAM et NAND, surtout dans les domaines de l'analyse en temps réel et des environnements exigeants de l'infonuagique et de la virtualisation (Forrester, 2015). En 2018, Intel a lancé la deuxième génération de son produit 3D Xpoint, sous son nom de marque Optane. Ce produit est disponible sur les marchés de consommation et d'entreprise. Puisqu'il s'agit d'une technologie intermédiaire, le géant technologique l'offre sous forme de mémoire ou de stockage pour l'informatique personnelle et pour les centres de données d'entreprise. Voici les diverses familles de produits Optane. (Intel, 2019)

- **Mémoire Intel Optane** : Offerte en format M.2, avec une interface PCIe NVMe 3.0x4 et une capacité de 16, 32 ou 64 Go. Il sert de lecteur cache fonctionnant en parallèle avec un lecteur de démarrage primaire pour transformer un disque dur ordinaire en disque hybride. L'algorithme de mise en cache stocke les fichiers fréquemment utilisés pour accélérer la réponse de l'ordinateur et améliorer la productivité du flux de travail.
- **SSD Intel Optane** : Famille de produits de consommation en format M.2 qui offre des capacités de 58 Mo à 2 To et assure une performance, une stabilité et une

efficacité énergétique. Le produit est conçu pour le stockage d'applications et de fichiers.

- **Mémoire persistante Intel Optane DC** : La technologie optimise la charge de travail pour aider les entreprises à extraire des connaissances utiles des données, dans le cadre de l'infonuagique, des bases de données, de l'analyse en mémoire et des réseaux de livraison de contenu.
- **SSD Intel Optane DC** : Produits offerts en formats U.2 et M.2, avec une capacité de 100 Go à 1,5 To. La solution, conçue pour les centres de données, élimine les goulots d'étranglement et réduit les coûts de transaction pour les charges de travail sensibles à la latence afin d'améliorer la qualité globale et de produire des ensembles de données rentables.

En 2019, le coût des technologies 3D Xpoint était d'environ un dollar par gigaoctet, soit un dixième du coût de la mémoire DRAM et cinq fois celui des SSD NAND. La mémoire Intel Optane exige des cartes mères qui prennent en charge un processeur Intel de 7^e génération ou plus récent et une fente M.2 (la majorité des cartes mères ont une seule fente M2). La technologie est seulement compatible avec la version 1803 (avril 2018) de Windows 10, ou une version plus récente. On peut utiliser un jeu de puces AMD, mais cela exige l'installation d'un logiciel spécialisé. (Walton, 2019)

L'organisation CERN exploite le grand collisionneur d'hadrons. En raison de la nature de leurs travaux, ils ont de grands besoins en matière de données. Les hiérarchies de mémoires actuelles ne conviennent pas aux vastes quantités de données qu'ils recueillent. Lorsqu'Intel a communiqué avec eux, ils ont indiqué que la mémoire DRAM crée un goulot d'étranglement dans leur infrastructure actuelle. Ils ont besoin d'une énorme capacité DRAM (ce qui est très coûteux) et doivent transférer les données vers les technologies flash et SSD. La technologie SSD Optane d'Intel répondrait bien à leurs besoins actuels en mémoire, puisqu'elle offre la densité requise, les données sont préservées en cas de perte d'alimentation, et l'écriture est plus rapide que pour la mémoire flash NAND. CERN a toutefois exprimé des doutes concernant le produit. Ils conviennent que le produit répond à leurs besoins, mais ils devraient remplacer tous leurs disques actuels et possiblement recoder leurs applications, ce qui entraînerait des risques et des coûts importants.

Utilisation par le gouvernement du Canada

Il y a très peu d'initiatives et de programmes documentés du gouvernement du Canada (GC) liés à l'analyse et au déploiement de 3D Xpoint. La situation peut s'expliquer principalement par le fait que le gouvernement doit actuellement composer avec la mise en œuvre de services infonuagiques et que la majorité des ressources sont ainsi occupées, et avec les enjeux de sécurité entourant la protection des renseignements des Canadiens.

Des entrevues et études approfondies auprès des directeurs de comptes de SPC et des ministères clients seront nécessaires afin de déterminer les exigences opérationnelles

liées à 3D Xpoint et d'examiner les incidences sur le réseau du gouvernement du Canada (GC).

Répercussions pour Services partagés Canada (SPC)

Proposition de valeur

La quantité de données créées et utilisées par le GC augmente exponentiellement. Le GC tire profit de ces données pour prendre des décisions avisées, obtenir des aperçus et améliorer les services.

Dans le cadre technologique actuel, il y a une lacune dans les niveaux de stockage de données. La mémoire DRAM est volatile et trop coûteuse pour une utilisation à grande échelle. La mémoire flash NAND offre la capacité et la rentabilité pour une utilisation à grande échelle (il s'agit d'un type de mémoire non volatile), mais sa performance ne suffit pas pour répondre aux besoins. Pour combler cette lacune, le GC a besoin d'une solution de stockage qui fonctionne comme une mémoire système.

L'une des responsabilités de base de Services partagés Canada (SPC) est de fournir aux organismes clients des services de centres de données modernes, sécuritaires et fiables : stockage, traitement et distribution à distance de données, y compris le stockage et le traitement en nuage. Il nous faudra intégrer la technologie 3D Xpoint à l'infrastructure de TI de SPC afin d'enrichir les services que nous offrons aux autres ministères.

Certains estiment que la technologie 3D Xpoint pourrait accroître la taille apparente de la mémoire, améliorer la performance ponctuelle du stockage des centres de données, permettre l'exploitation efficace de très grandes bases de données, supprimer les goulots d'étranglement sur les grands réseaux de données, appuyer les applications informatiques à haute performance, fournir les capacités de stockage et la vitesse requises pour les nuages hybrides et même servir de mémoire principale dans des systèmes hyperconvergés. (Rouse, 2016) 3D Xpoint permettrait aussi d'améliorer les applications du GC, y compris la formation des IA et l'apprentissage machine, l'analyse de données massives, le déploiement rapide de correctifs logiciels et la réduction des interruptions de service. (Moorhead, 2018)

On indique qu'Intel produit sans arrêt les produits de sa famille Optane, puisque l'entreprise est d'avis que la technologie aiderait les centres de données en réduisant les interruptions, en assurant une reprise rapide après une panne de courant, en accélérant le stockage pour les machines virtuelles et en offrant une grande performance pour les applications infonuagiques multipoints et distribuées. (Tallis, 2019)

La structure de cette technologie émergente réduit considérablement le nombre de cycles d'écriture, ce qui la rend plus durable et prolonge sa vie utile. De telles propriétés techniques pourraient accroître la portée du stockage de données d'entreprise. Puisque le domaine moderne de l'information est en constante évolution, la technologie pourrait fortement appuyer la capacité d'un organisme en matière d'apprentissage machine, d'analyse opérationnelle et, possiblement, d'informatique en périphérie. D'autres technologies en cours de développement, comme la ReRAM (mémoire RAM résistive) ou le memristor, ont des propriétés semblables, mais la 3D Xpoint serait complètement différente sur le plan physique.

Cas d'utilisation de 3D XPoint

3D Xpoint représente une nouvelle couche de stockage entre les mémoires flash et DRAM. Il est assez courant de répartir le stockage entre les disques durs et la mémoire flash. Les applications et les données à utilisation intensive qui ont besoin d'une plus grande vitesse sont stockées dans la mémoire flash, alors que les données et applications moins utilisées sont stockées sur disque dur. 3D Xpoint ajoute une couche au-dessus de la mémoire flash pour les données et les applications qui ont besoin d'une encore plus grande vitesse.

Les SSD Optane qui utilisent la technologie 3D Xpoint seraient particulièrement avantageux dans le cadre de la hiérarchie de stockage des centres de données de SPC. La hiérarchie courante des centres de données comprend trois niveaux. Le niveau « chaud » est la mémoire cache, le niveau « tiède », la mémoire flash NAND et le niveau « froid », les disques durs et les bandes magnétiques. Les SSD Optane se situent au milieu des niveaux chaud et tiède : ils offrent la vitesse du niveau chaud et la persistance du niveau tiède. La première génération de produits Optane d'Intel utilisait le format DIMM et offrait des capacités de 128, 256 et 512 Go, le chiffrement matériel pour assurer la sécurité des données et la détection des erreurs. (Mortillaro, 2018) Voici les principaux avantages de la technologie Optane.

- **Applications d'entreprise** : L'émergence de la 3D Xpoint comme nouvelle forme de stockage représente une transition technologique importante qui aura des incidences majeures sur les grands nuages et les centres de données à très grande échelle. Il s'agira d'une technologie dominante. Les produits Optane d'Intel permettent de traiter des ensembles aléatoires de données transactionnelles qui ne sont pas optimisées pour le traitement en mémoire. Par conséquent, la technologie répondre aux besoins de stockage de la partie supérieure du niveau tiède et d'une partie du niveau chaud, et permettra même d'élargir la mémoire du niveau chaud. Elle peut servir pour effectuer des analyses limitées en temps réel sur des ensembles de données actuels et pour mettre à jour des enregistrements en temps réel. (Mearian, 2017)
- **Performance des centres de données** : La technologie Optane améliore aussi la disponibilité des systèmes grâce à des redémarrages plus rapides. Intel affirme

que les nouvelles technologies augmentent considérablement la quantité de mémoire disponible pour le processeur et éliminent la latence associée au déplacement de données entre la mémoire et le stockage permanent. L'avantage de la persistance est qu'il n'est pas nécessaire de recharger les données en mémoire lors du redémarrage d'un ordinateur. À titre de démonstration, Intel a redémarré un serveur Aerospike de base de données en mémoire. Le redémarrage au moyen de mémoires DRAM et flash a pris 35 minutes. Avec un SSD Optane, cela n'a pris que 16,9 secondes. La technologie réduirait donc considérablement le temps requis pour appliquer des correctifs et des mises à jour du système d'exploitation. De plus, les produits Optane sont durables, puisqu'ils sont conçus pour des environnements à écriture fréquente. Cela accroît donc la durée de vie prévue d'un serveur. (Kampman, 2017)

3D Xpoint pourrait aussi faciliter l'habilitation en milieu de travail grâce à une meilleure performance des ordinateurs de travail, puisqu'Intel offre aussi des produits Optane sur le marché électronique de consommation. La solution Optane de mise en cache d'Intel permet à un ordinateur de démarrer deux fois plus vite et améliore de 28 % la performance globale du système. (Mearian, 2017) Le lecteur de mise en cache Intel Optane surveille les tendances d'accès aux données afin de prédire les besoins futurs de l'ordinateur. Des tests de performance de la technologie démontrent une différence importante en ce qui concerne le démarrage du système et le temps requis pour lancer une application ou charger des données. Intel a fait valoir que la nouvelle technologie accroît grandement la quantité de mémoire à laquelle les processeurs ont accès. Puisque la mémoire persistante a des incidences considérables pour les développeurs de logiciels, le géant technologique fournira un accès à distance à des appareils qui utilisent la mémoire persistante Optane pour faciliter le développement et la mise à l'essai de logiciels qui exploitent les capacités de cette mémoire. (Kampman, 2017)

Défis

Même si Intel et Micron ont vanté leurs produits 3D Xpoint comme un changement important pour l'industrie de la TI, la technologie n'a pas satisfait aux attentes. Intel soutient que la 3D Xpoint est 1000 fois plus rapide, mais des tests de performance effectués par des tiers démontrent seulement une réduction de la latence par un facteur de 10. Bien des gens estiment que les avantages de la transition de la mémoire flash NAND à la technologie 3D Xpoint sont moins importants que ceux de la transition de disques durs aux disques SSD. Puisque l'on met en question la crédibilité d'Intel en ce qui concerne la technologie, SPC devrait bien analyser ses exigences avant d'explorer la technologie. (Mortillaro, 2018) Voici les principales préoccupations relatives à la mémoire Optane d'Intel.

- **Production** : La production des produits Optane est compliquée. L'un des avantages de la technologie est sa densité en raison de sa structure empilable à

trois dimensions. Par contre, la première génération de produits 3D Xpoint ne comprenait que deux couches de cellules à un bit, avec un processus de fabrication à 20 nm et une puce de 128 Go. La technologie NAND, quant à elle, passe présentement de 64 à 96 couches. Il y a toutefois une grosse différence entre les processus liés aux couches des mémoires NAND et 3D Xpoint. La 3D Xpoint utilise une lithographie de pointe qui est coûteuse à cause des conducteurs verticaux et horizontaux. Cela complique le processus : certains experts doutent qu'il soit possible sur le plan économique d'élargir la technologie à de multiples couches. (Mellor, 2019)

- **Exigences système :** Le lecteur Optane de mise en mémoire cache, en particulier, présente des limites sur les plans logiciel et matériel. La technologie prend seulement en charge les systèmes qui tournent sous Windows 10 avec le correctif d'avril 2018. Les systèmes macOS et Linux sont donc exclus. Sur le plan matériel, Optane est seulement offert en format M.2, qui n'est pris en charge que par de nouvelles cartes mères avec un connecteur pour processeur Intel de la 7^e génération ou plus. De plus, le gouvernement du Canada fournit généralement aux fonctionnaires des ordinateurs portatifs. À l'heure actuelle, la majorité de ceux-ci n'ont pas de connecteur d'extension M.2. Par conséquent, le lecteur de mise en cache Optane ne fonctionnera pas sur la majorité des ordinateurs portatifs actuels. (Yamada, 2017)
- **Applications :** Il faut adapter les applications et les systèmes de stockage pour prendre en charge la nouvelle architecture. Le processus actuel de récupération de données prend trop de cycles de traitement lorsqu'un problème se produit au niveau des deux premières couches. La procédure actuelle exige aussi une participation importante au niveau du noyau. Le système d'Intel permet aux applications d'utiliser le matériel directement, presque comme dans l'accès direct à la mémoire effectué par des dispositifs d'entrée-sortie qui communiquent directement avec la mémoire vive. Le fait de donner cette capacité aux applications entraîne un risque de corruption des données. Les applications doivent aussi être codées au moyen d'une trousse de développement pour mémoire persistante.
- **Prix :** Au T2 2019, les produits Optane pour centres de données sont trop coûteux, même s'ils sont moins coûteux que la mémoire DIMM non volatile (mémoire vive). Son utilisation est principalement limitée aux mécanismes de mise en cache et en couches. En ce qui concerne les produits de mise en cache à l'intention des consommateurs, Intel offre 16 Go pour 23 \$, 32 Go pour 59 \$ et un nouveau produit de 64 Go pour 80 \$. Par contre, les utilisateurs ne comprennent pas comment utiliser cette mémoire. Elle n'offre pas assez d'espace pour stocker Windows 10 et les applications qui peuvent en tirer parti sont trop grosses et prennent tout l'espace. Le scénario envisagé par Intel est de combiner la mémoire cache avec un disque dur pour obtenir une performance comparable

à celle d'un SSD. Mais pourquoi, alors, ne pas simplement acheter un SSD qui offre la même performance à moindre prix? La solution Optane vise à résoudre un problème qui est déjà résolu. (Kampman, 2017)

Considérations

En ce qui concerne l'utilisation d'un SSD Optane, et de la technologie 3D Xpoint, il faut tenir compte de deux principaux facteurs. (Branscombe, 2018)

- **Architecture du centre de données** : Il faut envisager une nouvelle architecture des applications et des systèmes de stockage. Autrement, on ne peut profiter pleinement de la technologie. Cela s'applique tant pour les applications que pour la pile de protocoles. Intel tente d'atténuer ce problème au moyen d'un logiciel qui permet d'accéder à une adresse mémoire sur carte PCIe 3D Xpoint dans le cadre d'un bassin de mémoire. Il n'est donc pas nécessaire de modifier grandement le système d'exploitation pour prendre en charge la technologie. Il ne s'agit toutefois pas d'une solution permanente.
- **Coût** : Le second facteur important est le coût. Le coût de production devrait être inférieur à celui de la DRAM. Toutefois, compte tenu des volumes de production actuels, la 3D Xpoint est beaucoup plus coûteuse. À mesure que l'industrie adopte la technologie, le volume de production augmentera. À l'heure actuelle, par contre, le coût de la DRAM diminue aussi en raison de la demande élevée. Par conséquent, Intel n'est pas en mesure d'accroître la production de la 3D Xpoint.

Finalement, SPC pourrait examiner son catalogue de services actuel et les plans d'infrastructure afin de déterminer si l'on peut tirer profit de la 3D Xpoint pour accroître l'efficacité, réduire les coûts et améliorer le traitement et envisager les incidences de l'introduction de la nouvelle technologie sur la taille et la complexité du réseau du GC. Tous les nouveaux appareils ou plateformes 3D Xpoint acquis doivent avoir une valeur élevée sur le marché et pouvoir être intégrés facilement au réseau du GC.

Références

- Baltazar, H. & R. Fichera. (2015, 1^{er} octobre). *Brief : New Memory Innovations Will Power Extreme Service Performance*. Extrait de la publication de Forrester.
- Branscombe, M. (2018, June 4). *How Intel's New Optane Persistent Memory Will Change Your Data Center*. Récupéré sur datacenterknowledge : <https://www.datacenterknowledge.com/storage/how-intel-s-new-optane-persistent-memory-will-change-your-data-center>
- Cutress, I. (2018, July 16). *Intel and Micron To Dissolve 3D XPoint Partnership After 2019*. Récupéré sur anandtech : <https://www.anandtech.com/show/13083/intel-and-micron-update-3d-xpoint-roadmap-combined-effort-2nd-gen-3rd-gen-separate>
- Gangam, V. (2018, July 24). *Solve the Most Demanding Storage and Memory Challenges with Intel Optane*. Récupéré sur lanworks : <https://lanworks.com/solve-the-most-demanding-storage-and-memory-challenges-with-intel-optane/>
- Intel. (2019, July 31). *Intel Optane Technology*. Récupéré sur Intel : <https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/intel-optane-technology2.html>
- Jain, A. (2018, August 16). *Is 3D Xpoint a phase change memory?* Récupéré sur Quora : <https://www.quora.com/Is-3D-Xpoint-a-phase-change-memory>
- Kampman, J. (2017, April 24). *Intel's 32GB Optane Memory storage accelerator reviewed*. Récupéré sur Tech Report : <https://techreport.com/review/31784/intels-32gb-optane-memory-storage-accelerator-reviewed/>
- Malventano, A. (2017, June 2). *How 3D XPoint Phase-Change Memory Works*. Récupéré sur pcper : <https://pcper.com/2017/06/how-3d-xpoint-phase-change-memory-works/>
- Mearian, L. (2017, May 4). *FAQ: 3D XPoint memory – NAND flash killer or DRAM replacement?* Récupéré sur computerworld.com : <https://www.computerworld.com/article/3194147/faq-3d-xpoint-memory-nand-flash-killer-or-dram-replacement.html>
- Mellor, C. (2019, January 22). *3D XPoint needs to be bigger and cheaper. But how will it get there?* Récupéré sur blocksandfiles.com : <https://blocksandfiles.com/2019/01/22/great-expectations-xpoint-evolution-envisaged/>

- Moorhead, P. (2018, August 8). *Intel Makes Storage Integral To Data Center Architecture, And That's Smart*. Récupéré sur forbes : <https://www.forbes.com/sites/patrickmoorhead/2018/08/08/intel-makes-storage-integral-to-data-center-architecture-and-thats-smart/#7a2aa09278b3>
- Morra, J. (2018, July 24). *Intel Winds Down 3D XPoint Development with Micron*. Récupéré sur electronicdesign : <https://www.electronicdesign.com/embedded-revolution/intel-winds-down-3d-xpoint-development-micron>
- Mortillaro, M. (2018, November 5). *What Future for Intel Optane?* Récupéré sur Kamshin : <https://www.kamshin.com/2018/11/what-future-for-intel-optane/>
- Rouse, M. (2016, April 29). *3D XPoint*. Récupéré sur searchstorage.techtarget : <https://searchstorage.techtarget.com/definition/3D-XPoint>
- Tallis, B. (2019, January 14). *Micron Exercises Option to Buyout Intel's Share of IMFT*. Récupéré sur anandtech : <https://www.anandtech.com/show/13862/micron-exercises-option-to-buyout-intels-share-of-imft>
- Walton, J. (2019, May 6). *Intel Optane Memory: everything you need to know*. Récupéré sur pcgamer : <https://www.pcgamer.com/intel-optane-memory-everything-you-need-to-know/>
- Wikipedia. (2019, July 27). *3D XPoint*. Récupéré sur Wikipédia : https://en.wikipedia.org/wiki/3D_XPoint
- Wikipedia. (2019, July 20). *Solid-state drive*. Récupéré sur Wikipédia : https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state_drive
- Yamada, K. (2017, May 2). *10 Reasons Why Intel's Bleeding-Edge Optane Drive Is a Rip-Off*. Récupéré sur makeuseof.com : <https://www.makeuseof.com/tag/reasons-why-intel-optane-drive-rip-off/>

¹ <https://www.techopedia.com/definition/2787/memory>

² <https://www.techopedia.com/definition/9966/volatile-storage>

³ <https://www.techopedia.com/definition/9966/volatile-storage>

⁴ <https://courses.lumenlearning.com/collegesuccess2x48x115/chapter/volatile-and-non-volatile-computer-memory-session-6/>

⁵ <https://www.techopedia.com/definition/2793/non-volatile-memory-nvm>

⁶ <https://searchstorage.techtarget.com/definition/NAND-flash-memory>

⁷ <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/69459/3d-xpoint>