Note de cours : La ram

[COURS-2026-TWES]

📚 Type de document : Cours

La RAM — Notes de cours complètes et exhaustives

Introduction et contexte

📖 **Définition :** : RAM = Random Access Memory, mémoire à accès aléatoire utilisée pour stocker temporairement des données et instructions en cours d'exécution.

🎯 **Application :** : exécution des programmes, caches du système d'exploitation, chargement des jeux, traitement en temps réel (audio/vidéo), virtualisation.

- ### Contexte historique ou pratique
- Évolution générale : SRAM (cache rapide, coûteux) → DRAM (moins chère, volatile) → SDRAM (synchronisée) →

DDR (Double Data Rate) et ses générations DDR1 → DDR5, puis variantes spécialisées (LPDDR pour mobiles, GDDR/HBM pour GPU).

• Raison d'être : augmentation des vitesses CPU/GPU et des charges mémoire (data science, jeux, virtualisation) a poussé l'innovation : augmentation du débit (MT/s), réduction de la latence, amélioration de l'efficacité énergétique, introduction de fonctionnalités (ECC, PMIC, On-Die ECC).

🎯 **Application :** : conception de PC grand public, serveurs, datacenters, smartphones, FPGA/ASIC.

Types de RAM

• ### Concepts fondamentaux

• Différencier technologie (SRAM vs DRAM) et implémentation/module (DIMM, SO-DIMM) et usage (LPDDR, GDDR, HBM).

• Notions de module vs puce : un module (DIMM) regroupe plusieurs puces mémoires, éventuellement un contrôleur d'alimentation (PMIC) ou des circuits de correction (On-Die ECC).

📖 **Définition :** : SRAM = Static RAM, mémoire très rapide qui conserve les données tant que l'alimentation est présente, utilisée pour caches (L1, L2).

📖 **Définition :** : DRAM = Dynamic RAM, mémoire qui nécessite des rafraîchissements réguliers pour maintenir les données, moins coûteuse que SRAM, utilisée pour la RAM système.

📖 **Définition :** : SDRAM = Synchronous DRAM, DRAM synchronisée sur l'horloge du bus mémoire.

📖 **Définition :** : DDR = Double Data Rate, SDRAM qui transfère des données sur les fronts montant et descendant de l'horloge, effective = 2× fréquence d'horloge.

📖 **Définition :** : DIMM = Dual Inline Memory Module, module mémoire pour desktops (taille et broches variables selon DDRx).

📖 **Définition :** : SO-DIMM = Small Outline DIMM, version compacte pour laptops et petits systèmes.

📖 **Définition :** : LPDDR = Low Power DDR, variante pour mobiles/embarqués optimisée en consommation et packaging.

📖 **Définition :** : GDDR = Graphics DDR, mémoire dédiée GPU (ex : GDDR5, GDDR6) optimisée pour bande passante élevée.

📖 **Définition :** : HBM = High Bandwidth Memory, mémoire empilée (stacked) à large bus et faible latence utilisée pour GPU/accélérateurs.

📖 **Définition :** : ECC = Error Correcting Code, mécanisme de correction/détection d'erreurs mémoire (utile en serveurs/fiabilité).

📖 **Définition :** : NVDIMM = Non-Volatile DIMM, module combinant DRAM et mémoire non-volatile pour persistance.

📖 **Définition :** : PMIC = Power Management IC, contrôleur d'alimentation intégré sur certains modules (p.ex. DDR5).

💡 **Exemple :** :

• Un PC de bureau utilise des UDIMM DDR4 3200 MT/s, 16 Go (2×8 Go en dual-channel).

• Un laptop utilise SO-DIMM LPDDR4X soudée (8 Go) pour faible consommation.

• Une carte GPU haut de gamme utilise GDDR6X 19 Gbps pour haute bande passante.

• Un serveur critique utilise RDIMM ECC DDR4 2666 MHz en quad-channel avec correction d'erreur.

🔧 **Méthode :** : pour choisir un type de RAM :

1. Déterminer l'usage (gaming, serveur, mobile, GPU).

2. Vérifier compatibilité CPU et carte mère (génération DDR supportée, slots).

3. Choisir capacité et nombre de modules en fonction du canal mémoire et de la densité.

4. Sélectionner features nécessaires (ECC, Registered, low-voltage).

5. Valider fréquence, latences, profils (XMP/EXPO).

🎯 **Application :** :

- Gaming : privilégier fréquence et dual/quad channel, latence raisonnable.
- Station de travail/serveur : privilégier ECC, stabilité, capacité, registered (RDIMM) pour grands kits.
- Ordinateur portable : privilégier LPDDR pour économie d’énergie et espace.

⚠️ **Attention :** : ne pas confondre DDR et GDDR ; ne pas mélanger DIMM de générations différentes ; vérifier contraintes de voltage et du contrôleur mémoire CPU.

- ### Détails sur modules et classifications
- UDIMM vs RDIMM vs LRDIMM vs SODIMM

  📖 **Définition :** : UDIMM = Unbuffered DIMM, standard pour desktop.

  📖 **Définition :** : RDIMM = Registered DIMM, utilise un registre pour réduire charge électrique sur le contrôleur, utilisé pour serveurs.

📖 **Définition :** : LRDIMM = Load-Reduced DIMM, utilise un buffer pour réduire la charge encore plus, permet plus de modules par canal.

📖 **Définition :** : SODIMM = Small Outline DIMM, pour ordinateurs portables.

> 💡 **Exemple :** : Serveur 2P Xeon : RDIMM ou LRDIMM obligatoires, mix interdit.

⚠️ **Attention :** : RDIMM et UDIMM incompatibles ensemble ; mixing peut empêcher le démarrage.

Générations DDR (DDR1 → DDR5) — focus technique

• ### Concepts fondamentaux

• Paramètres clés : fréquence (MT/s), bande passante (MB/s ou GB/s), latences CAS (CL), timings (tRCD, tRP, tRAS, tRFC), voltages, préfetch, bank groups, burst length.

📖 **Définition :** : MT/s = MegaTransfers per second, mesure effective du taux de transfert (souvent noté 3200 MT/s).

📖 **Définition :** : CAS Latency (CL) = nombre de cycles d’horloge entre la commande de lecture et la disponibilité du premier mot de données.

📖 **Définition :** : tRCD = Row to Column Delay, cycles entre l’activation d’une ligne et la lecture d’une colonne.

📖 **Définition :** : tRP = Row Precharge Time, temps pour fermer une ligne et préparer la suivante.

📖 **Définition :** : tRAS = Row Active Time, temps minimal pendant lequel une ligne doit rester active.

📖 **Définition :** : Bandwidth = fréquence effective × largeur bus (ex : DDR4 3200 en dual channel sur 64 bits par canal).

📖 **Définition :** : Rank = ensemble de puces sur un module adressable comme une unité ; single-rank, dual-rank.

📖 **Définition :** : Bank = subdivision logique d’une puce DRAM permettant accès parallèle.

📖 **Définition :** : Bank group = groupement de banques permettant plus haut débit (introduit dans DDR4/DDR5).

- ### DDR4 — caractéristiques

📖 **Définition :** : DDR4 = génération de DDR avec tensions nominales autour de 1.2 V, fréquences typiques 1600–3200+ MT/s, prefetch 8n.

- Innovations : bank groups, améliorations en densité, reduced voltage, meilleure efficacité.

> 💡 **Exemple :** : Module DDR4-3200 CL16 : CL=16 cycles à 1600 MHz réel → latence ≈ (16 / 1600) ms × 1000 = 10 ns (plus la latence liée au reste des timings).

🔧 **Méthode :** : Calculer latence en ns :

6. Diviser MT/s par 2 pour obtenir fréquence d'horloge en MHz (ex : 3200 MT/s → 1600 MHz).
7. Latence (ns) = (CL / fréquence en MHz) × 1000.

🎯 **Application :** : DDR4 reste la norme pour de nombreux systèmes desktop et serveurs jusqu'à transition complète vers DDR5.

⚠️ **Attention :** : Les latences en cycles augmentent souvent avec la fréquence ; comparer latence en ns plutôt qu'en CL seul.

- ### DDR5 — caractéristiques

📖 **Définition :** : DDR5 = génération suivante avec fréquences plus élevées (4800 MT/s et plus), PMIC intégré sur DIMM, On-Die ECC, bank groups améliorés, burst length étendu.

- Tensions nominales : ~1.1 V (varie), PMIC gère alimentation.

> 💡 **Exemple :** : DDR5-4800 CL40 : fréquence réelle 2400 MHz → CL40 → latence ≈ (40 / 2400) × 1000 ≈ 16.67 ns.

🔧 **Méthode :** : Pour comparer DDR4-3200 CL16 et DDR5-4800 CL40, calculer latences en ns et bande passante par canal.

🎯 **Application :** : DDR5 pour systèmes haut-de-gamme, serveurs, performances mémoire soutenues pour IA/ML.

⚠️ **Attention :** : Latences cycle supérieures mais bande passante et features (On-Die ECC, PMIC) compensent ; compatibilité matérielle stricte (CPU/mobo).

- ### Autres générations (DDR3, DDR2)
- Contexte historique, vitesses, tensions, compatibilités. DDR3 typique 800–2133 MT/s, 1.5 V; DDR2/1 obsolètes.

⚠️ **Attention :** : Pas d'intercompatibilité physique entre générations (différentes encoches pins).

Timings, fréquence, bande passante, et calculs pratiques

• ### Concepts fondamentaux

• Timings primaires : CL, tRCD, tRP, tRAS ; timings secondaires et tertiaires plus complexes.

• Latence réelle en ns dépend de la fréquence; plus la fréquence augmente, plus la latence (en cycles) peut augmenter, mais latence en nanosecondes peut rester stable ou s'améliorer.

• Bande passante (GB/s) par canal = (MT/s × largeur du bus en bits) / 8 / 1000.

> 💡 **Exemple :** : DDR4-3200 en single channel (64-bit) : (3200 × 64) / 8 = 25,600 MB/s ≈ 25.6 GB/s.

🔧 **Méthode :** : Calculer bande passante effective :

8. Utiliser MT/s × 8 bytes (car 64 bits = 8 bytes).

9. Multiplier par nombre de canaux.

> 💡 **Exemple :** : DDR4-3200 en dual-channel = 25.6 GB/s × 2 = 51.2 GB/s.

- ### Ranks et impact sur performances

  📖 **Définition :** : Rank = groupe logique de puces mémoires qui peut être activé indépendamment ; dual-rank se comporte souvent comme deux modules pour interleaving.

> 💡 **Exemple :** : Dual-rank peut offrir un léger gain en bande passante ou latence dans certains accès grâce à interleaving ; mais augmente la charge électrique possible réduisant fréquences maxi.

⚠️ **Attention :** : Placer trop de ranks peut dépasser la capacité du contrôleur mémoire et limiter les fréquences supportées.

Canaux mémoire et configuration (single, dual, quad, octa)

- ### Concepts fondamentaux

• Channel = voie indépendante entre contrôleur mémoire et modules ; multi-channel permet accès parallèle et bande passante accrue.

📖 **Définition :** : Dual-channel = deux canaux mémoire indépendants, généralement améliorer bande passante si modules appariés.

🔧 **Méthode :** : Installer kits RAM en paires sur slots indiqués par la carte mère (manuel).

> 💡 **Exemple :** : 2×8 Go en dual-channel vs 1×16 Go en single-channel : dual-channel offre quasi 2× bande passante mémoire, améliorant jeux et charge multi-thread.

⚠️ **Attention :** : Mélanger modules de fréquences/timings différents peut forcer mode le plus bas (downclock) ou désactiver certains optimisations (XMP non applicable).

XMP (Extreme Memory Profile) et EXPO (AMD) — profils et OC mémoire

• ### Concepts fondamentaux

📖 **Définition :** : XMP = Extreme Memory Profile d'Intel, profils SPD (Serial Presence Detect) permettant d'activer

des paramètres mémoire testés (fréquence, timings, voltage).

📖 **Définition :** : EXPO = Extended Profiles for Overclocking d'AMD, équivalent XMP optimisé pour plateformes AMD.

📖 **Définition :** : SPD = Serial Presence Detect, zone EEPROM sur DIMM qui stocke paramètres de base et profils XMP/EXPO.

⚠️ **: XMP/EXPO ne garantissent pas la stabilité sur toutes les cartes mères et CPU ; ils appliquent des paramètres au-delà des JEDEC par défaut.**

🔧 **Méthode :** : Activer XMP/EXPO :

10. Entrer BIOS/UEFI.
11. Trouver option XMP/EXPO ou « Memory Profile ».
12. Sélectionner profil (p.ex. XMP Profile 1).
13. Sauvegarder et redémarrer.
14. Tester stabilité (MemTest86, stress tests).

> 💡 **Exemple :** : Kit DDR4-3600 CL16 avec XMP active passe de JEDEC 2133 à 3600 MT/s ; CPU IMC doit supporter cette vitesse.

🎯 **Application :** : Permet overclocking simple pour gamers et enthousiastes sans réglages manuels complexes.

⚠️ **Attention :** : Activer XMP peut nécessiter augmenter DRAM voltage, System Agent voltage (Intel) ou ajuster VDD/VDDQ ; vérifier refroidissement et limtes CPU; XMP peut déclencher instabilités si IMC ne supporte pas.

- ### EXPO vs XMP — différences
- EXPO vise optimiser timings et profiles pour plateformes AMD Ryzen; certains kits vendus pour AMD viennent avec EXPO natif.

> 💡 **Exemple :** : Un kit 3600 CL16 peut avoir profil XMP et profil EXPO légèrement différents pour garantir compatibilité maximale.

⚠️ **Attention :** : Ne pas activer simultanément profils XMP et EXPO ; choisir celui correspondant au CPU/fabricant.

Overclocking mémoire — méthodes et sécurité

• ### Concepts fondamentaux

• Overclock = augmenter fréquence/ajuster timings beyond JEDEC pour booster bande passante, parfois au détriment de latence ou stabilité.

🔧 **Méthode :** : Processus d'overclock mémoire (manuel et sécurisé) :

15. Activer XMP/EXPO comme point de départ OR commencer à partir de JEDEC stock.

16. Augmenter fréquence par petits paliers (ex : +200 MT/s).

17. Réduire timings primaires si possible (CL, tRCD, tRP) après validation de stabilité.

18. Ajuster voltage DRAM par petits incréments (ex : +0.05 V) pour stabiliser.

19. Tester stabilité après chaque modification (MemTest86, HCI MemTest, Prime95 Blend, stress apps).

20. Revenir en arrière si erreurs ou plantages.

> 💡 **Exemple :** : Passer DDR4-3200 CL16 à 3600 CL16 avec légère augmentation de VDRAM de 1.35 → 1.37–1.40 V et test sur 6–12 h de MemTest.

⚠️ **Attention :** : Risque de surchauffe, dégradation sur le long terme, garantie potentiellement annulée ; ne pas dépasser limites recommandées par fabricant.

Spécificités DDR4 vs DDR5 (comparatif approfondi)

• ### Concepts fondamentaux

• DDR5 ajoute PMIC sur la DIMM, On-Die ECC, densités plus élevées, canaux internes (two subchannels per DIMM) améliorant efficacité.

📖 **Définition :** : On-Die ECC = correction d'erreurs intégrée dans la puce mémoire pour réduire taux d'erreurs internes.

💡 **Exemple :** :

• DDR4: DIMM = 1 canal logique 64-bit ; DDR5: chaque DIMM peut avoir 2 x 32-bit subchannels → améliore granularité.

• DDR5 nominalement commence à 4800 MT/s ; kits très hautes vitesses existent (6400, 7200+).

🔧 **Méthode :** : Mise à niveau DDR4 → DDR5 :

21. Vérifier compatibilité carte mère et CPU (socket/génération).

22. Remplacer modules et configurer BIOS, activer profils (XMP 3.0 pour DDR5 sur certaines plateformes).

⚠️ **Attention :** : DDR5 peut nécessiter BIOS récent, parfois microcodes CPU ; montée en fréquence plus sensible à qualité IMC.

Méthodes pratiques d'installation et de test

• ### Installation physique

🔧 **Méthode :** :

23. Éteindre et débrancher l'alimentation.

24. Mettre bracelet antistatique ou toucher châssis métallique.

25. Ouvrir loquets du slot DIMM.

26. Aligner encoches du module avec le slot et insérer perpendiculairement.

27. Presser jusqu'au clic de fermeture des loquets.

28. Rallumer et entrer BIOS pour vérifier détection.

⚠️ **Attention :** : Forcer peut casser module ou slot ; vérifier orientation.

- ### Vérification initiale BIOS/OS

🔧 **Méthode :** :

29. Vérifier capacité reconnue et fréquence.

30. Activer XMP/EXPO si désiré.

31. Vérifier voltage et timings affichés.

32. Démarrer système d’exploitation, vérifier via CPU-Z ou outils similaires.

- ### Tests de stabilité

🔧 **Méthode :** :

33. MemTest86 : tests de base et avancés en dehors du système d’exploitation.

34. HCI MemTest / Windows Memory Diagnostic : tests en OS.

35. Stress CPU+RAM : Prime95 Blend, AIDA64 memory stress.

36. Temps de test recommandé : au moins 4–8 heures pour certifier stabilité, idéal 24–48 h pour overclocks.

> 💡 **Exemple :** : MemTest86 8 heures sans erreurs = bonne indication de stabilité.

• ### Benchmarks et mesure de performance

🔧 **Méthode :** :

37. Mesurer bande passante avec AIDA64, SiSoftware Sandra.

38. Mesurer latence avec latency benchmarks (AIDA64 Memory Latency).

39. Mesurer gains réels via tests applicatifs (rendu 3D, encodage, jeux).

🎯 **Application :** : Valider que modifications mémoire améliorent la charge cible (p.ex. jeux à haute fréquence d'images ou rendu multi-thread).

Exercices pratiques (exo)

• ### Exercice 1 : Calcul de latence en ns

🔧 **Méthode :** :

40. Donné : DDR4-3200 CL16. Calculer latence.

41. Fréquence (MHz) = 3200 / 2 = 1600 MHz.

42. Latence (ns) = (16 / 1600) × 1000 = 10 ns.

> 💡 **Exemple :** : Comparer à DDR5-4800 CL40 → fréquence réelle 2400 MHz → latence = (40 / 2400) × 1000 ≈ 16.67 ns.

- ### Exercice 2 : Calcul bande passante

🔧 **Méthode :** :

43. Donné : DDR4-3600 en dual channel.

44. Single channel bandwidth = (3600 × 8) bytes = 28,800 MB/s ≈ 28.8 GB/s.

45. Dual-channel = 2 × 28.8 = 57.6 GB/s.

> 💡 **Exemple :** : Vérifier via AIDA64.

- ### Exercice 3 : Compatibilité et sélection

🔧 **Méthode :** :

46. Choisir RAM pour une build gaming Ryzen 7 (AM4) : vérifier support (p.ex. DDR4), choisir kit dual-channel 2×16 Go 3600 CL16 EXPO/XMP compatible, valider QVL carte mère.

> 💡 **Exemple :** : Si carte mère BIOS ancien, vérifier liste QVL ; si pas listé, vérifier retours utilisateurs.

• ### Exercice 4 : Activation XMP et test

🔧 **Méthode :** :

47. Activer XMP dans BIOS.

48. Lancer MemTest86 et Prime95 ; enregistrer erreurs et temps.

49. Si instable, réduire fréquence ou augmenter tension progressivement.

⚠️ **Attention :** : Consigner chaque paramètre pour revenir en arrière.

Applications pratiques — cas concrets

- ### Cas d'usage 1 : PC gaming (budget, mid, haut de gamme)
- Budget : 16 Go (2×8) DDR4-3200 CL16, dual-channel, XMP activé, priorité fréquence.
- Mid : 32 Go (2×16) DDR4-3600 CL16 ou DDR5-5200 2×16 selon plateforme, privilégier kit en dual-channel.
- Haut : 32–64 Go DDR5 haute fréquence pour jeux + streaming, refroidissement, vérification bios.

🎯 **Application :** : Meilleure expérience en multitâche et frame-rate stable.

- ### Cas d'usage 2 : Station de travail / rendu
- Grande capacité (64–256 Go) souvent RDIMM/LRDIMM ECC selon serveurs.
- Priorité sur capacité et fiabilité plutôt que fréquence extrême.

⚠️ **Attention :** : Mélanger RDIMM et LRDIMM interdit ; ECC nécessaire pour workloads sensibles aux erreurs.

- ### Cas d'usage 3 : Serveur / Datacenter

• On utilise RDIMM/LRDIMM/3DS, souvent Registered ECC ; priorité densité, fiabilité, hot-swap pour NVDIMM.

🎯 **Application :** : Bases de données, virtualisation à grande échelle.

• ### Cas d'usage 4 : Mobile / embarqué

• LPDDR4X / LPDDR5 soudés, priorité consommation et taille ; non-upgradable.

⚠️ **Attention :** : Réparer ou upgrader impossible sur la plupart des laptops récents avec LPDDR soudées.

Points d'attention et erreurs courantes

• Mélanger générations DDR différentes (ex : DDR4 et DDR5) ≠ impossible physiquement MAIS ils ne sont pas compatibles : slot/nombre de pins/enclenchements différents.

• Mélanger modules de fréquences/timings/capacités différentes entraîne downclock ou instabilités.

• Confondre GDDR (GPU) et DDR (système) : impossibles à interchanger.

• Négliger compatibilité CPU/Carte mère : vérifier QVL (Qualified Vendor List).

• Activer XMP/EXPO sans test de stabilité : peut provoquer plantages et corruption de données.

• Ignorer voltage et limites thermiques : overvolting endommage puces ou réduit longévité.

• Installer mémoire en mauvaise configuration de channel : perforrmance réduite (p.ex. 1×16Go au lieu de 2×8).

• Omettre de mettre à jour BIOS : nouveaux profils/compatibilités pour DDR5 ou hautes fréquences.

• Confondre latence en cycles (CL) et latence en temps (ns) : ne pas comparer CL seul.

Résumé et points clés à retenir

⚠️ : Choisir la RAM nécessite vérifier compatibilité CPU/mobo, type (DDR4 vs DDR5), format (DIMM vs SO-DIMM), capacity et configuration (single/dual/quad channel).

• La fréquence augmente bande passante, mais la latence doit être comparée en ns pour juger performance réelle.

• XMP/EXPO facilitent l’overclock mais ne garantissent pas stabilité universelle : tester systématiquement.

• Serveurs et workloads critiques requièrent ECC et modules registerés ; consommation et densité dictent choix pour mobiles.

• Overclock mémoire offre gains mais avec risques ; procéder par étapes et tester.

Lexique complet des termes techniques

📖 **Définition :** : RAM = Random Access Memory, mémoire volatile pour stockage temporaire des données.

📖 **Définition :** : SRAM = mémoire statique, utilisée pour caches, très rapide, coûteuse.

📖 **Définition :** : DRAM = mémoire dynamique, nécessite rafraîchissement, utilisée pour RAM système.

📖 **Définition :** : SDRAM = DRAM synchronisée à l’horloge du système.

📖 **Définition :** : DDR = Double Data Rate, transfert sur deux bords d’horloge.

📖 **Définition :** : DIMM = module mémoire pour desktops.

📖 **Définition :** : SO-DIMM = module compact pour laptops.

📖 **Définition :** : LPDDR = Low Power DDR, version mobile.

📖 **Définition :** : GDDR = Graphics DDR, mémoire dédiée GPU.

📖 **Définition :** : HBM = High Bandwidth Memory, mémoire empilée à très large bus.

📖 **Définition :** : ECC = Error Correcting Code, correction critique pour fiabilité.

📖 **Définition :** : NVDIMM = Non-Volatile DIMM, mémoire durable combinée à DRAM.

📖 **Définition :** : PMIC = Power Management Integrated Circuit, gestion d'alimentation sur module.

📖 **Définition :** : SPD = Serial Presence Detect, EEPROM contenant profils mémoire.

📖 **Définition :** : XMP = Intel Extreme Memory Profile, profils préconfigurés d'overclock.

📖 **Définition :** : EXPO = Extended Profiles for Overclocking (AMD), profil optimisé AMD.

📖 **Définition :** : MT/s = MegaTransfers per second, unité de débit mémoire.

📖 **Définition :** : CL = CAS Latency, cycles avant disponibilité du premier mot.

📖 **Définition :** : tRCD, tRP, tRAS = principaux timings mémoire.

📖 **Définition :** : Rank = groupe de puces adressées ensemble.

📖 **Définition :** : Bank/Bank group = subdivisions pour accès parallèles.

📖 **Définition :** : UDIMM = Unbuffered DIMM, pour desktop.

📖 **Définition :** : RDIMM = Registered DIMM, pour serveur, réduit charge électrique.

📖 **Définition :** : LRDIMM = Load-Reduced DIMM, améliore nombre de modules supportés.

📖 **Définition :** : JEDEC = organisme standardisant profils mémoires par défaut.

📖 **Définition :** : PMU/IMC = Integrated Memory Controller, unité souvent dans le CPU gérant la mémoire.

Fin du document — ces notes forment une référence complète pour comprendre, choisir, configurer, tester et optimiser la mémoire RAM dans une grande variété de contextes (desktop, mobile, serveur, GPU).

👨‍🏫 Professeur : Julien Mievis

📅 Date de création : 20/01/2026