

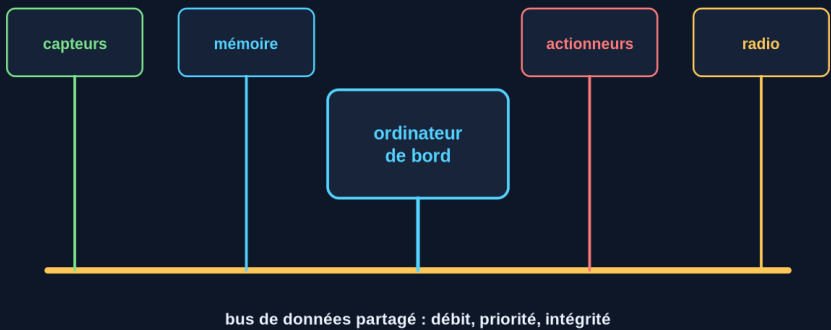
# Ordinateur de bord et données : calculer, mémoriser, commander et télémesurer

## Réponse essentielle

Ordinateur de bord et données : calculer, mémoriser, commander et télémesurer. La question à résoudre est la suivante : Que fait réellement l'ordinateur du vaisseau quand personne n'appuie sur un clavier ? Des capteurs produisent des mesures, le logiciel les horodate et les traite, commande des actionneurs, stocke des données et prépare la télémesure. La suite du cours montre comment passer de cette idée à un raisonnement contrôlable : unités explicites, hypothèses annoncées, calculs reproductibles, ordre de grandeur et limites d'interprétation. Le résultat n'est utile que si l'on peut expliquer ce qu'il mesure, d'où viennent les nombres et quelle décision d'ingénierie il éclaire.

### Ordinateur de bord et bus de données

Les capteurs, mémoires, actionneurs et radios échangent des messages via des interfaces définies



Des capteurs produisent des mesures, le logiciel les horodate et les traite, commande des actionneurs, stocke des données et prépare la télémesure.

Électronique de calcul, acquisition et commande.

## Avant de calculer

|                  |                                                                               |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Grandeur:</b> | Ordinateur de bord et données : calculer, mémoriser, commander et télémesurer |
| <b>Contrôle:</b> | unités + ordre de grandeur + hypothèses                                       |
| <b>Décision:</b> | expliquer ce que le résultat autorise réellement à conclure                   |

Ordinateur de bord et données : calculer, mémoriser, commander et télémesurer

2 — Les mots indispensables, expliqués avant de les utiliser

Électronique de calcul, acquisition et commande.  
Surveillance détectant un calculateur bloqué.

3 — Voir l’architecture avant de calculer

Une valeur doit être identifiée, calibrée et horodatée.  
Filtrer, naviguer, contrôler ou compresser.  
Appliquer l’ordre au bon équipement dans le bon état.  
Conserver ce qui ne peut pas être transmis immédiatement.

4 — Les formules, seulement lorsqu’elles répondent à une question

Comment cela se lit : données égale débit multiplié par temps  
R en bit/s, t en s donne D en bits.  
Comment cela se lit : un octet égale huit bits  
Vérifier la conversion entre débit et mémoire.

5 — Ce que les unités et les marges veulent dire

bit, octet, bit/s, kbit/s, Mbit/s, MB/GB selon convention explicitée.

6 — Trois démonstrations concrètes, calculées pas à pas

2 Mbit/s pendant 30 min.  
900 MB à 3 Mbit/s.  
20 capteurs 16 bits à 100 Hz.

7 — Approfondissement : ce que le schéma simplifié cache

Plus central simplifie certaines fonctions mais concentre les dépendances.  
Sans horodatage cohérent, fusion et diagnostic deviennent difficiles.  
Volatile et non volatile n’ont pas le même rôle au redémarrage.  
Bits retournés et perturbations exigent mitigation et récupération.  
Les journaux doivent permettre de reconstruire une panne.

8 — Application à un vaisseau Terre-Mars

9 — Dossier de référence : ce qu’un vrai projet doit encore prendre en compte

Lecture active

|               |                                                                                                          |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sections:     | 2 — Les mots indispensables, expliqués avant de les utiliser ; 3 — Voir l’architecture avant de calculer |
| Vérification: | Une valeur n’est exploitable qu’avec son unité et sa frontière de calcul.                                |
| Exercice:     | modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer                           |

**Ordinateur de bord et données : calculer, mémoriser, commander et télémesurer**

Il reçoit des télémesures, exécute des commandes, horodate des événements, supervise des bus de données, lance des algorithmes GNC, stocke des données et contribue à la détection des pannes. Certaines fonctions sont temps réel : une boucle d'attitude ne peut pas attendre plusieurs secondes qu'un autre logiciel termine. D'autres sont moins urgentes, comme compresser une image scientifique. L'architecture informatique répartit donc priorités, processeurs, mémoires et réseaux selon les délais et les conséquences d'une perte.

La RAM est rapide mais perd généralement son contenu sans alimentation. Une mémoire non volatile conserve code, paramètres et données après redémarrage. Pour une mission longue, il faut protéger les images logicielles de référence, journaux d'anomalies et configurations capables de restaurer un état sûr. La mémoire elle-même peut subir erreurs de bits dues au rayonnement. Des codes de correction d'erreur, scrubbing, copies redondantes et redémarrages contrôlés contribuent à la résilience.

Capteurs, actionneurs et ordinateurs échangent leurs données via des liaisons et protocoles. Débit, latence, déterminisme, topologie et tolérance aux pannes déterminent le choix. Un bus très rapide n'est pas nécessairement meilleur s'il augmente complexité, consommation ou sensibilité. Il faut aussi gérer les adresses, priorités, synchronisation et erreurs. Une panne de réseau peut rendre des équipements sains inaccessibles ; l'architecture de communication interne fait donc partie de la sûreté du véhicule.

Deux mesures prises à des instants différents ne peuvent pas être fusionnées correctement si leur horodatage est faux. Une dérive d'horloge peut donc affecter navigation, communication, séquences et reconstruction d'une panne. Le véhicule maintient des références temporelles, distribue le temps aux équipements et enregistre les événements. Pour les opérations à longue distance, il faut aussi distinguer le temps embarqué, le temps de réception au sol et les délais de propagation.

Une particule énergétique peut modifier temporairement un bit ou perturber un circuit sans détruire définitivement le matériel. On parle notamment de single-event upset pour certains événements. Le système doit donc distinguer erreur récupérable et dommage permanent. La tolérance peut combiner composants adaptés, blindage, redondance, vote, mémoire corrigée, watchdog et reconfiguration. L'objectif n'est pas de prétendre qu'aucune erreur n'arrivera, mais de continuer à fonctionner ou de revenir dans un état sûr lorsque l'erreur survient.

Si le logiciel se contente d'afficher « erreur », l'équipage ou le sol manque d'informations. Des journaux structurés enregistrent événements, valeurs importantes, changements de mode, resets et messages de bus. Il faut cependant gérer le volume : conserver tout en permanence peut saturer la mémoire ou le lien radio. On choisit donc niveaux de journalisation, fenêtres temporelles et priorités. Une bonne observabilité permet de reconstituer la séquence causale après une anomalie.

Un véhicule habité ou une base peut répartir le calcul entre plusieurs contrôleurs locaux plutôt que dépendre d'un unique ordinateur central. Cette distribution peut isoler des pannes et réduire le câblage, mais elle complique synchronisation, mise à jour logicielle et diagnostic. Sur Mars, la maintenance doit considérer aussi les fichiers de configuration, outils de programmation, versions de firmware et capacité à remplacer un calculateur par un matériel compatible. L'avionique devient donc une chaîne logistique numérique autant qu'un ensemble de cartes électroniques.

**Lecture active**

**Sections:** Ordinateur de bord et données : calculer, mémoriser, commander et télémesurer

**Vérification:** Une valeur n'est exploitable qu'avec son unité et sa frontière de calcul.

**Exercice:** modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer

Ordinateur de bord et données : calculer, mémoriser, commander et télémesurer

10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions

Croire que plus de processeur résout une mauvaise architecture.  
Enregistrer beaucoup mais pas les bonnes variables.

L’ordinateur de bord transforme des capteurs en décisions vérifiables

Le calcul embarqué reçoit télémesures et commandes, exécute le logiciel de vol, pilote des actionneurs et conserve des données malgré des ressources limitées. Les bus de données doivent garantir débit, synchronisation, adressage et comportement en cas d’erreur. Un débit nominal élevé n’est pas utile si un équipement monopolise le bus ou si la latence d’une commande critique devient imprévisible.

La mémoire n’est pas seulement une capacité en gigaoctets. Certaines zones contiennent logiciel validé, tables de configuration ou événements indispensables au diagnostic. Les erreurs induites par le rayonnement peuvent nécessiter ECC, scrubbing, redondance ou composants qualifiés. Une stratégie de reprise doit distinguer donnée scientifique perdable et état de commande vital.

La télémetrie est enfin une interface humaine. Si le véhicule envoie trop peu d’informations, une panne devient invisible ; s’il en envoie trop, le canal et les opérateurs sont saturés. On choisit donc des paramètres capables de reconstruire l’état et de tester les hypothèses de diagnostic.

11 — Exercices guidés

Question : Quelle question faut-il poser avant de choisir un équipement ?  
Question : Pourquoi un résultat nominal ne suffit-il pas ?

12 — À retenir

Expliquer le sujet avec des mots simples avant les symboles.  
Relier au moins quatre interfaces avec les autres sous-systèmes.  
Refaire les trois exemples numériques sans saut de raisonnement.

13 — Sources NASA pour approfondir

NASA - 2026 State-of-the-Art: Small Spacecraft Avionics  
NASA - 2026 State-of-the-Art: Complete Spacecraft Platforms

Lecture active

|               |                                                                                                                                                           |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sections:     | 10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions ; L’ordinateur de bord transforme des capteurs en décisions vérifiables                                     |
| Vérification: | NASA - 2026 State-of-the-Art: Small Spacecraft Avionics   NASA - 2026 State-of-the-Art: Complete Spacecraft Platforms   NASA Systems Engineering Handbook |
| Exercice:     | modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer                                                                            |