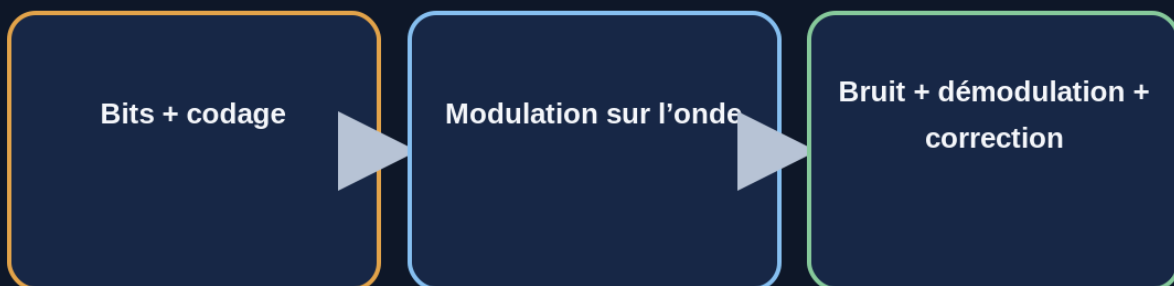


AM-10.07 — Modulation et correction d'erreurs : comment des bits survivent à un signal imparfait

Comment une onde radio ou un laser transporte-t-il réellement des zéros et des uns, et pourquoi le récepteur peut-il corriger certaines erreurs sans redemander tout le message ?

AM-10.07 · SPACE ACADEMY

Du bit transmis au bit reconstruit



Delta-Sierra · Space Academy

Le récepteur ne récupère pas une copie parfaite du signal : il estime les symboles puis exploite la redondance pour reconstruire les données.

1 - Comprendre la scène

Une antenne reçoit une onde très faible noyée dans du bruit. Pourtant l'ordinateur doit décider si la séquence envoyée était 101101... Le transmetteur ne lance pas des chiffres dans l'espace : il fait varier une propriété du signal selon des règles connues. Le récepteur mesure ces variations et reconstruit les symboles puis les bits.

Comme certaines décisions seront fausses, les systèmes ajoutent de la redondance structurée. Un code correcteur d'erreurs permet au récepteur de détecter et parfois corriger des bits erronés. Cela coûte une partie du débit brut, mais évite des retransmissions qui seraient très pénalisantes entre Mars et la Terre.

2 - Vocabulaire essentiel

Porteuse - Onde de base dont certaines propriétés sont modifiées pour transporter l'information.

Modulation - Règles utilisées pour modifier amplitude, phase, fréquence ou autre propriété du signal afin de coder des symboles.

Symbole - État transmis pendant un intervalle ; un symbole peut représenter un ou plusieurs bits selon la modulation.

Bit - Unité binaire, généralement 0 ou 1.

BER - Bit Error Rate : fraction de bits reçus de manière erronée.

Codage correcteur - Ajout de redondance mathématique permettant de détecter ou corriger certaines erreurs.

Interleaving - Réorganisation temporaire des bits ou symboles pour répartir les erreurs groupées.

3 - Mécanisme pas à pas

1 — Construire des symboles

Le transmetteur regroupe les bits et choisit pour chaque groupe un état du signal. Dans une modulation simple, deux phases différentes peuvent représenter 0 et 1 ; des modulations plus riches représentent plusieurs bits par symbole.

2 — Le canal ajoute du bruit et des pertes

Distance, bruit électronique, interférences et imperfections déforment le signal. Le récepteur ne retrouve jamais une copie parfaite de ce qui est parti.

3 — Décider puis vérifier

Le démodulateur choisit le symbole le plus probable. Le décodeur exploite ensuite la redondance du code pour repérer les combinaisons impossibles ou peu plausibles et corriger certaines erreurs.

4 — Adapter le débit

Quand la liaison se dégrade, réduire le débit ou employer un codage plus robuste peut améliorer la probabilité de réception correcte. Le « meilleur débit » dépend donc de la marge disponible.

4 - Formules et lecture

$$\text{BER} = \text{bits faux} / \text{bits reçus}$$

« BER égale nombre de bits faux divisé par nombre de bits reçus ».

Un taux est une fraction : on compare le nombre d'erreurs au nombre total de bits observés.

$$\text{débit utile} = \text{débit brut} \times \text{taux de code}$$

« débit utile égale débit brut multiplié par le taux de code », dans un modèle pédagogique simple.

Si une partie des bits transmis sert à la redondance du code, le débit d'information utile est inférieur au débit brut du canal.

5 - Unités et vérification

Le débit binaire s'exprime en bit/s, kbit/s, Mbit/s ou Gbit/s. Le BER est sans unité : c'est un rapport. Un taux de code comme 1/2 signifie, dans une lecture simplifiée, qu'environ la moitié des bits transmis porte l'information utile et l'autre moitié contribue à la redondance de protection.

Un débit brut élevé n'est pas forcément un bon débit utile si la liaison produit trop d'erreurs. La métrique importante est la quantité d'information correcte réellement livrée.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — Calculer un BER

Sur 1 000 000 de bits reçus, 100 sont faux avant correction.

$$\text{BER} = 100 \div 1,000,000$$

$$\text{BER} = 0.0001$$

$$\text{BER} = 10^{-4}$$

Conclusion: Cela signifie un bit erroné sur dix mille en moyenne avant correction dans cet exemple.

Exemple 2 — Taux de code 1/2

Le canal transmet 2 Mbit/s bruts avec un code pédagogique de taux 1/2.

débit utile $\approx 2 \times 1/2$
débit utile ≈ 1 Mbit/s

Conclusion: La redondance coûte du débit brut, mais elle peut rendre le transfert beaucoup plus fiable.

Exemple 3 — Pourquoi ne pas retransmettre sans cesse

Un bloc de 100 Mo met longtemps à traverser une liaison Terre-Mars faible.

Sans correction, une erreur peut forcer une retransmission.

Avec un code, certaines erreurs sont corrigées localement.

Le délai de propagation n'est pas payé une deuxième fois pour chaque petite erreur.

Conclusion: Le codage transforme de la bande passante en robustesse et peut réduire les retransmissions coûteuses.

7 - Approfondissement

Modulation plus riche

Des modulations capables de représenter plusieurs bits par symbole peuvent augmenter l'efficacité spectrale, mais demandent généralement une meilleure qualité de signal. Le système adapte donc complexité et débit à la marge.

Codage et profondeur de décodage

Les codes modernes utilisent des algorithmes sophistiqués. Le cours n'entre pas dans les matrices ni les graphes, mais l'idée reste que la redondance n'est pas du remplissage aléatoire : elle possède une structure conçue pour retrouver l'information.

Erreurs groupées

Une perturbation peut endommager un groupe de bits consécutifs. L'interleaving répartit ces erreurs dans plusieurs mots de code afin qu'elles deviennent plus faciles à corriger.

Télécommande critique

Les commandes vitales peuvent privilégier robustesse et validation stricte plutôt que débit. Une photo scientifique volumineuse et une commande d'arrêt d'urgence n'ont pas les mêmes exigences de transmission.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

Un réseau martien devra modifier automatiquement ou manuellement ses modes selon la distance, les antennes disponibles, la météo des stations optiques et l'état du relais. Comprendre modulation et codage aide à comprendre pourquoi le débit varie sans que l'émetteur soit forcément « en panne ».

Cette couche relie le monde physique du budget de liaison au monde numérique des fichiers. Elle explique comment une puissance reçue devient finalement une information fiable.

9 - Pièges fréquents

- Confondre symbole et bit.
- Croire qu'un code correcteur peut réparer une liaison sans signal.
- Calculer un BER sans préciser avant ou après décodage.
- Comparer des débits sans préciser débit brut ou utile.
- Supposer que la modulation la plus complexe est toujours meilleure.

10 - Exercices guidés

Question: 10 bits faux sur 100 000 : BER ?

Réponse: $10 \div 100\,000 = 10^{-4}$.

Question: 4 Mbit/s bruts avec taux 3/4 : débit utile pédagogique ?

Réponse: $4 \times 0,75 = 3$ Mbit/s.

Question: Pourquoi réduire le débit peut aider ?

Réponse: Cela peut augmenter l'énergie disponible par bit et permettre un mode de modulation/codage plus robuste, selon l'architecture réelle.

11 - À savoir expliquer

- Expliquer comment une onde porte des bits.
- Distinguer bit et symbole.
- Calculer un BER simple.
- Expliquer l'intérêt d'un code correcteur.
- Distinguer débit brut et débit utile.

12 - Sources NASA / JPL

NASA - Small Spacecraft Communications

<https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/soa-communications/>

NASA - Radio vs Optical Spectrum

<https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/radio-vs-optical-spectrum/>

Ressource pédagogique libre : ce cours explique les principes pour un public débutant. Il ne remplace ni la conception de mission, ni les modèles de vol opérationnels, ni les procédures, essais et validations d'une agence spatiale.