Comprendre les câbles S/PDIF

Guide pour non-spécialistes | IEC 60958 | AES3

Vidéo explicative : https://youtu.be/8LsX1QZG2hU

Ce guide explique en termes simples ce qu'est le signal audio numérique S/PDIF, comment il se propage dans un câble, et ce qui peut ou ne peut pas le dégrader. Aucune formule mathématique - uniquement les principes physiques essentiels et les faits établis par les normes internationales.

Normes de référence : IEC 60958-1:2021 (format, codage BMC, interface électrique) | IEC 60958-3 (grand public, S/PDIF) | AES3 / IEC 60958-4-4 (professionnel, AES/EBU)

1. Qu'est-ce que le S/PDIF ?

Le S/PDIF (Sony/Philips Digital Interface Format), parfois écrit Spdif, transporte l'audio numérique d'un lecteur, d'une console, d'un téléviseur ou d'un décodeur vers un amplificateur ou un convertisseur numérique-analogique (DAC). Il est défini par la série de normes IEC 60958.

- Liaison coaxiale non symétrique, impédance de référence : 75 ohms
- Niveau de sortie nominal : 0,5 V crête à crête (plus ou moins 20 %)
- Entrée du récepteur : gabarit d'oeil de 200 mV de hauteur sur 0,5 UI, centré sur le seuil de décision (IEC 60958-3)
- Connecteurs : RCA (grand public) ou BNC (professionnel), ou fibre optique TOSLINK
- Fréquences d'échantillonnage : 44,1 à 192 kHz selon les équipements

La variante professionnelle s'appelle AES/EBU (AES3). Elle utilise une paire torsadée symétrique de 110 ohms avec des connecteurs XLR et un niveau de 2 à 7 V (5 V typiques). Ce niveau plus élevé et la symétrie la rendent plus robuste au bruit. Au-delà de 100 m, l'EBU prévoit une égalisation facultative au récepteur (EBU Tech 3250).

2. Comment le signal est-il codé ?

Le S/PDIF utilise le codage BMC (Biphase Mark Code), défini dans IEC 60958-1. Ce n'est pas un simple signal 0/1 : il transporte à la fois les données et l'horloge.

Principe du BMC :

- Chaque bit occupe deux cellules et commence toujours par une transition
- Si le bit vaut 1 : une deuxième transition apparaît au milieu du bit
- Si le bit vaut 0 : pas de transition au milieu
- Le signal n'a pas de composante continue et le récepteur en extrait l'horloge

Une cellule dure 1/(128 x fs), soit 177,2 ns à 44,1 kHz. La fondamentale la plus haute du signal (une suite de 1) est à 64 x fs, soit 2,8 MHz à 44,1 kHz : c'est dans cette zone de fréquences que les pertes du câble comptent.

IEC 60958-1 - Codage BMC : transition à chaque frontière de bit, transition supplémentaire au milieu du bit pour un 1. Pas de composante continue.

3. Ce que fait le câble au signal

Quatre phénomènes physiques agissent sur le signal pendant sa propagation :

1. Pertes et arrondi des fronts

Les pertes d'un câble augmentent avec la fréquence (effet de peau, puis pertes du diélectrique). Les harmoniques des fronts sont plus atténuées que la fondamentale : les fronts s'arrondissent et chaque transition garde une trace des précédentes (interférence entre symboles). Cela décale légèrement les instants de transition. Pour un bon coaxial 75 ohms, l'effet reste de quelques dizaines de picosecondes sur 10 m et de moins d'une nanoseconde sur 100 m.

2. Atténuation

Le signal perd de l'amplitude avec la distance, proportionnellement à la longueur (en dB). La norme fixe un gabarit : un oeil d'au moins 200 mV de hauteur sur 0,5 UI, centré sur le seuil de décision (l'amplitude crête à crête ne suffit pas). Un bon câble coaxial perd environ 1,3 dB sur 100 m à 2,8 MHz : l'amplitude n'est pas le facteur limitant aux longueurs domestiques.

3. Réflexions (désadaptation d'impédance)

Si l'impédance du câble diffère des 75 ohms de la source et du récepteur (cas de certains câbles RCA génériques), une partie du signal fait un aller-retour de plus et arrive en écho, 2L/v après le front. Tant que cet écho revient en moins d'une cellule, il retombe sur le palier qui précède chaque front : sur un câble peu atténué, il retarde surtout les fronts et le jitter reste faible ; sur un câble à fortes pertes, il recopie une partie de l'interférence entre symboles. À 44,1 kHz, ce régime couvre les 15 à 22 premiers mètres selon le câble. Au-delà, l'écho ajoute un jitter qui dépend des données. Les prises RCA non 75 ohms (quelques centimètres) sont trop courtes pour réfléchir une part notable des fronts (de l'ordre de 1 % au plus pour des fronts de 20 ns).

4. Bruit électromagnétique (EMI)

Un câble mal blindé capte les perturbations de l'environnement (alimentations, éclairage LED, moteurs). Ce bruit s'ajoute au signal, décale les passages au seuil et, s'il devient important, provoque des erreurs de décodage.

4. Le jitter : mythe et réalité

Le jitter est l'écart des transitions par rapport à une horloge parfaite. Il est souvent avancé pour justifier des câbles numériques très chers. La physique permet de le chiffrer.

Le rôle de la PLL du récepteur

Le récepteur reconstruit son horloge avec une boucle à verrouillage de phase (PLL), qui laisse passer le jitter lent et atténue le jitter rapide. L'efficacité dépend de sa bande passante : une PLL ancienne à large bande (CS8412, PLL de type 2 : -3 dB vers 38 kHz d'après la courbe de sa datasheet) laisse passer une bonne part du jitter d'interface ; une PLL à bande étroite ou un convertisseur de fréquence asynchrone (ASRC) l'atténue très fortement, sans le supprimer totalement. Avec une horloge maître externe (Word Clock), le jitter du câble n'atteint plus le convertisseur.

Ce que dit la recherche sur l'audibilité :

- Jitter sinusoïdal (Benjamin et Gannon, Dolby, AES 1998) : seuil moyen de 10 ns RMS sur un sinus de 20 kHz à pleine échelle (jitter à 17 kHz), 100 ns sur un sinus de 4 kHz. Sur la grande majorité des musiques, le jitter n'était pas audible ; sur des extraits choisis pour être révélateurs, les seuils individuels allaient de 20 à 370 ns selon le sujet
- Jitter aléatoire sur de la musique (Ashihara et al., 2005, 23 auditeurs) : aucun ne le détecte à 250 ns, 6 à 500 ns, tous à 2 µs
- Tests en double aveugle : insertion d'une boucle 16 bits / 44,1 kHz (Meyer et Moran, JAES 2007) : 276 réponses justes sur 554 essais, le hasard. Nous n'avons trouvé aucune étude à comité de lecture comparant en aveugle deux câbles S/PDIF ; les essais voisins ne montrent rien d'audible aux niveaux qu'ajoute un câble : les seuils de jitter mesurés sont des centaines de fois plus hauts, deux sources CD ne se distinguent pas globalement (Stereophile juge le résultat ambigu) et un câble Ethernet n'est pas reconnu par 6 personnes sur 7 (test sommaire, jugé peu probant par son auteur)
- Critères théoriques, calculés pour le pire cas et non mesurés en écoute : Dunn (AES 1992) demande moins de 20 ps crête à crête pour un jitter à 20 kHz, Benchmark des raies 23 dB sous le bruit du convertisseur, soit quelques picosecondes. Ce sont des cibles de conception ; les avis divergent
- À comparer au jitter d'un Belden 1694A de 10 m dans le simulateur : 0,05 ns crête à crête sans bruit (0,015 ns RMS avec le bruit simulé d'un salon), des centaines à des milliers de fois moins que les seuils mesurés en écoute

AES3 (EBU Tech 3250) : un récepteur doit tolérer 0,25 UI crête à crête de jitter au-dessus d'environ 8 kHz (44 ns à 44,1 kHz) et bien davantage en basse fréquence.

5. Longueurs : ce qui limite vraiment

Avec une impédance adaptée, il n'y a pas d'écho : la longueur n'est limitée que par les pertes et par le bruit capté. Le simulateur donne par exemple plus de 200 m pour un Belden 1694A en S/PDIF et pour un Belden 1800F en AES/EBU (limite de la recherche). En AES/EBU, ce résultat tient au niveau simulé de 5 V : au minimum normatif de 2 V, le 1800F plafonne vers 190 m à 44,1 kHz. Le modèle reste optimiste (gabarit minimal sans marge, récepteur idéal). En cas de désadaptation, l'écho ne crée un jitter dépendant des données qu'au-delà de la longueur L0 :

Fréquence	L0, câble à 82 % de c	L0, câble à 55 % de c

44,1 kHz	21,8 m	14,6 m
48 kHz	20,0 m	13,4 m
96 kHz	10,0 m	6,7 m
192 kHz	5,0 m	3,4 m

L0 = v x T/2, où v est la vitesse de propagation dans le câble et T la durée d'une cellule. En dessous, l'écho retarde surtout les fronts ; il ne laisse qu'un jitter résiduel, qui grandit avec les pertes du câble et reste très inférieur aux seuils d'audibilité publiés.

6. Câbles coaxiaux : comment les comparer ?

Les caractéristiques à vérifier sur la fiche technique :

- Impédance : 75 ohms (S/PDIF) ou 110 ohms (AES/EBU). Beaucoup de câbles RCA génériques en sont éloignés.
- Atténuation vers 3 à 10 MHz : plus elle est faible, plus le câble peut être long. Vérifier à quelle fréquence la valeur est donnée.
- Blindage : une feuille aluminium doublée d'une tresse protège mieux qu'une tresse seule.
- Vitesse de propagation : 66 à 85 % de c selon le diélectrique. Elle fixe le retard d'un éventuel écho.

Câbles RCA non spécifiés : ce ne sont pas des câbles S/PDIF et leur impédance est rarement de 75 ohms. Au-delà d'une quinzaine de mètres, l'écho de désadaptation ajoute un jitter qui dépend des données.

7. Câbles optiques TOSLINK et fibre de verre

TOSLINK (fibre plastique) :

Le TOSLINK transmet le signal S/PDIF par de la lumière rouge (650 nm) dans une fibre plastique. Il isole électriquement les appareils (plus de boucle de masse) et ne capte pas de perturbations électromagnétiques.

- Portée : fixée par la paire de modules émetteur et récepteur, de 0,2 à 5 m pour la paire audio Toshiba TOTX147/TORX147. La fibre offre au moins 40 MHz sur 100 m en injection restreinte (IEC 60793-2-40). Au-delà de 5 m, le résultat du simulateur n'est pas significatif : les modules ne sont pas modélisés.
- Fréquence d'échantillonnage : la même paire accepte 15 Mb/s en NRZ, soit 7,5 Mb/s en biphase ; 96 kHz passe (6,1 Mb/s), 192 kHz non (12,3 Mb/s)
- Jitter : apporté par les modules, pas par la fibre (distorsion de largeur d'impulsion de plus ou moins 15 ns pour la paire TOTX147/TORX147)
- Atténuation de la fibre : environ 0,2 dB/m à 650 nm (non appliquée au signal simulé, les modules optiques n'étant pas modélisés)

Fibre de verre (connecteur ST) :

Certaines installations professionnelles et certains appareils haut de gamme utilisent de la fibre de verre multimode 62,5/125 µm avec des connecteurs ST.

- Atténuation de 3,5 dB/km au plus à 850 nm (maximum ISO/IEC 11801 pour la fibre OM1 câblée ; 2,7 à 3,2 dB/km au plus pour les fibres des fabricants), contre environ 200 dB/km pour la fibre plastique
- Bande passante de 200 MHz.km (OM1) : aucune limite pratique pour le S/PDIF

- Comme le TOSLINK : pas de réflexion électrique, pas de captation de bruit

Point clé : en optique, ce sont les modules émetteur et récepteur qui déterminent le jitter et la portée, pas la fibre.

8. Idées reçues et faits physiques

Idée reçue : un câble numérique haut de gamme sonne mieux

Les données S/PDIF sont binaires, pas leur forme d'onde : les bits arrivent corrects ou en erreur (clics, coupures). Entre deux câbles qui livrent les mêmes bits, hors effets électriques (boucle de masse, bruit conduit par le blindage jusqu'à la masse analogique, que l'optique supprime), seule une différence de jitter peut subsister. Sans ASRC, ce jitter atteint l'horloge du convertisseur après filtrage par la PLL, mais pour des câbles conformes il reste très en dessous des seuils d'audibilité mesurés en écoute.

Idée reçue : le jitter du câble dégrade le son

Un Belden 1694A ajoute environ 0,05 ns crête à crête sur 10 m et moins d'une nanoseconde sur 100 m (sans bruit). Les seuils de détection publiés : 10 ns en moyenne dans le pire cas (sinus de 20 kHz), dès quelques dizaines de nanosecondes sur des extraits musicaux choisis, plusieurs centaines de nanosecondes en jitter aléatoire sur musique.

Idée reçue : l'argent améliore le signal

L'argent conduit environ 6 % mieux que le cuivre, ce qui réduit très peu les pertes. L'impédance, la géométrie et le blindage comptent beaucoup plus que le métal du conducteur.

Idée reçue : l'optique est toujours meilleure que le coaxial

Les deux transmettent le signal sans erreur aux longueurs courantes. Le coaxial 75 ohms porte plus loin et supporte mieux les hautes fréquences d'échantillonnage ; l'optique supprime la boucle de masse passant par le câble, utile quand plusieurs appareils sont reliés à la terre, mais elle porte moins loin (quelques mètres en TOSLINK) et ses modules ajoutent leur propre jitter.

9. Recommandations pratiques

- Installation domestique de quelques mètres : tout câble coaxial 75 ohms conforme convient (Belden 1694A, Canare L-5CFB, Mogami 2964, etc.)
- Éviter les câbles RCA génériques non spécifiés au-delà d'une quinzaine de mètres
- En optique : 96 kHz passe avec la paire audio Toshiba, 192 kHz dépasse son débit
- Bruit de fond ou ronflement : vérifier les masses des appareils avant de changer de câble
- Longues distances : câble 75 ohms professionnel ou liaison AES/EBU 110 ohms ; au-delà de 100 m, l'EBU prévoit une égalisation facultative au récepteur

---

Références : IEC 60958-1:2021 | IEC 60958-3 | AES3-4-2009 | EBU Tech 3250 (2004) | C. Dunn et M. Hawksford, AES preprint 3360 (1992) | J. Dunn, 'Jitter: Specification and Assessment in Digital Audio Equipment', AES preprint 3361 (1992) | E. Benjamin et B. Gannon, AES preprint 4826 (1998) | K. Ashihara et al., Acoust. Sci. & Tech. 26(1), 2005 | Datasheets Belden, Canare, Toshiba TOTX147 et TORX147