

Le câblage Gigabit sur paires torsadées

■ Luc SACCAVINI, luc.saccavini@inrialpes.fr
INRIA, Rhône-Alpes

Après un rappel sur les principaux points techniques du câblage catégorie 5/classe D, on décrit les évolutions induites sur les spécifications du câblage par l'arrivée en juin 1999 du standard Ethernet gigabit sur paires torsadées. Après une revue de l'évolution en cours des standards de câblage, on propose une spécification type basée sur la nouvelle catégorie 5 E, les projets de standards de catégorie 6 ou 7 n'étant pas encore assez matures, notamment sur les aspects connectique.

■ Rappels sur le câblage catégorie 5/ Classe D

La spécification internationale de ce type de câblage date de la parution de la norme ISO11801 : 1995 (ou de son équivalent européen EN50173) soit mai 1995. Cette spécification porte à la fois sur les composants du câblage (câbles, connecteurs, cordons de brassage), sur l'installation réalisée et en partie les méthodes de test. Pour les composants, la norme spécifie le niveau de performances par des catégories numérotées de 3 à 5, et pour l'installation par classes allant de A à D suivant la fréquence nominale maximum d'utilisation. L'association catégorie/classe donne aux liens réalisés en paires torsadées les portées suivantes :

	Classe A (maximum 100kHz)	Classe B (maximum 1MHz)	Classe C (maximum 16MHz)	Classe D (maximum 100MHz)
Catégorie 3	2000 m	200 m	100 m	-
Catégorie 4	3000 m	260 m	150 m	-
Catégorie 5	3000 m	260 m	160 m	100 m

Pour les réseaux informatiques l'association catégorie 5/ classe D est la plus couramment utilisée. Par réduction de langage les installations correspondantes sont souvent qualifiées de « câblage catégorie 5 ». Il est à noter que ce dernier vocable peut entraîner une confusion avec le standard nord américain ANSI/TIA 568-A, cependant très proche de la norme ISO11801 : 1995.

Le câblage catégorie 5/ classe D permet le support de tous les réseaux courants tels que : Token-ring, Ethernet 10 et 100 Mb/s, ATM 155 Mb/s, etc. La transmission des données de ce type de réseaux se fait plutôt sur 2 paires si l'on exclue les standards Ethernet 10BaseT4 et 100VG-AnyLAN plus utilisés actuellement. Dans ces conditions d'usage (transmission sur 2 paires), les paramètres physiques les plus importants à mesurer pour qualifier une installation sont l'affaiblissement, la paradiaphonie, et la marge active résultante. La définition de ces principaux paramètres est la suivante :

L'affaiblissement

Il est dû à la perte d'énergie du signal le long des conducteurs. Il est induit par les pertes résistives et l'émission électromagnétique qui se produit à haute fréquence. Il augmente avec la longueur des conducteurs et la fréquence du signal émis. Sa mesure (en dB) exprime le rapport entre l'énergie émise et l'énergie reçue. Plus la valeur mesurée est **petite**, meilleur est le lien.

La paradiaphonie (NEXT)

La paradiaphonie est l'une des 2 observations possibles de la diaphonie qui est l'émission parasite d'une paire sur une autre. Comme les conducteurs d'un même câble suivent des directions parallèles, un couplage capacitif se produit entre ces conducteurs. Une partie de l'énergie perdue par affaiblissement sur une paire est ainsi transférée sur une autre paire. Cette émission parasite augmente avec la longueur et la fréquence d'émission. Elle est aussi augmentée au passage des connecteurs RJ45 dont la géométrie (8 connecteurs parallèles et très proches) la favorise. Sa mesure (en dB) exprime le rapport entre l'énergie émise sur une paire **d'un coté** du lien et l'énergie reçue sur une autre paire **du même coté** du lien (NEXT = Near End Cross Talk). Plus la valeur mesurée est **grande**, meilleur est le lien.



La marge active (ACR)

Il s'agit de la différence entre les mesures en dB de paradiaphonie et d'affaiblissement (ACR = Attenuation to Cross Talk Ratio). Cette valeur est une mesure de la marge active disponible entre l'atténuation et la diaphonie. Elle doit être supérieure au rapport signal/bruit admissible par les équipements actifs qui sont de part et d'autre du lien pour que la transmission puisse se faire correctement. On a donc la relation $ACR = NEXT - \text{Affaiblissement}$. Plus la valeur mesurée est **grande**, meilleur est le lien.

■ Nouveautés introduites par l'Ethernet gigabit (standard IEEE 802.3ab)

Pour permettre l'augmentation en débit d'un facteur 10 par rapport à la version à 100Mb/s (IEEE 802.3u) sans augmenter notablement la fréquence fondamentale des signaux transmis, les concepteurs du standard 802.3ab ont joué sur plusieurs paramètres. Le type de codage a été amélioré (passage de 3 à 5 niveaux), les 4 paires d'un lien (au lieu de 2) sont utilisées, et chaque paire fonctionne en émission et en réception simultanément (au lieu d'une paire en émission et un autre en réception).

L'objectif des concepteurs de ce standard était bien sûr de tout faire pour que l'Ethernet gigabit puisse fonctionner sur les câblages catégorie 5 existants.

La transmission simultanée et bidirectionnelle sur les 4 paires d'un lien a comme conséquence pour la certification du système de câblage que de nouveaux paramètres doivent être testés. Ce sont principalement : la paradiaphonie cumulée, la perte en retour, le délai différentiel de transmission, ainsi que les paramètres résultants comme les différentes marges actives 'cumulées'. La définition de ces paramètres est la suivante :

La paradiaphonie cumulée (PSNEXT)

Il s'agit du bruit parasite induit sur une paire quand les n-1 autres paires d'un câble sont en émission, d'où le terme de paradiaphonie cumulée. Comme pour la paradiaphonie paire à paire (NEXT), cette émission parasite augmente avec la longueur, la fréquence d'émission, et au passage des connecteurs RJ45. Sa mesure (en dB) exprime le rapport entre l'énergie émise sur les n-1 paires **d'un coté** du lien et l'énergie reçue sur la dernière paire **du même coté** du lien (PSNEXT = Power Sum Near End Cross Talk). Plus la valeur mesurée est **grande**, meilleur est le lien.

La marge active « cumulée » (PSACR)

C'est la différence entre les mesures en dB de paradiaphonie cumulée et d'affaiblissement. Ce critère est mieux adapté que la marge active paire à paire (ACR) quand les équipements qui sont de part et d'autre du lien utilisent les 4 paires d'un lien simultanément. (PSACR = Power Sum Attenuation to Cross Talk Ratio). On a donc la relation : $PSACR = PSNEXT - \text{Affaiblissement}$, et plus la valeur mesurée est **grande**, meilleur est le lien.

La télédiaphonie (FEXT)

La télédiaphonie est la deuxième observation possible de la diaphonie (émission parasite d'une paire sur une autre). La seule différence par rapport à la paradiaphonie (NEXT), est le point de mesure du bruit induit qui change de côté. Sa mesure (en dB) exprime donc le rapport entre l'énergie émise sur une paire **d'un coté** du lien et l'énergie reçue sur une autre paire **de l'autre coté** du lien (FEXT = Far End Cross Talk). Plus la valeur mesurée est **grande**, meilleur est le lien.

La télédiaphonie compensée (ELFEXT)

C'est la différence entre les mesures en dB de télédiaphonie et d'affaiblissement (ELFEXT = Equal Level Far End Cross Talk). Comme l'ACR, cette valeur est une mesure de la marge active paire à paire disponible entre l'atténuation et la diaphonie. Elle doit être supérieure au rapport signal/bruit admissible par les équipements actifs qui sont de part et d'autre du lien pour que la transmission puisse se faire correctement. On a donc la relation $ELFEXT = FEXT - \text{Affaiblissement}$. Plus la valeur mesurée est **grande**, meilleur est le lien.

La télédiaphonie compensée cumulée (PSELFEXT)

Il s'agit de la télédiaphonie compensée induite par l'ensemble des n-1 paires d'un câble sur la dernière. (PSELFEXT = Power Sum Equal Level Far End Cross Talk). Il s'agit donc d'une mesure de la marge active cumulée laissée entre l'atténuation et la télédiaphonie. Elle est la symétrique du PSACR. Ce critère est adapté aux liens qui doivent supporter des transmissions de signaux bidirectionnels simultanément sur leurs paires. On a la relation : $PSELFEXT = PSFEXT - \text{Affaiblissement}$. Plus la valeur mesurée est **grande**, meilleur est le lien.

La perte en retour (RL)

Il s'agit de l'énergie re-émise vers la source (RL = Return Loss). Elle est essentiellement induite par les changements d'impédance locale sur le lien lors des traversées de connecteurs (qui suppriment localement la torsade), et de jarretières (dont le câble peut être légèrement différent). Sa mesure (en dB) exprime le rapport entre l'énergie émise et l'énergie reçue en retour sur la même paire. Plus la valeur mesurée est **grande**, meilleur est le lien.

Le délai différentiel de transmission (SKEW)

Il s'agit de la différence entre les temps de transmission sur les différentes paires d'un câble. Cette différence provient du pas de torsade différent utilisé pour chaque paire d'un lien afin de réduire la paradiaphonie. Cette différence de longueur peut atteindre 5%. Elle est couramment mesurée en ns.

■ Evolution récente des standards de câblage

Les principales structures qui font évoluer les standards de câblage sont l'ANSI/TIA, l'ISO et l'IEC. Leurs travaux se font souvent en parallèle, mais avec un souci d'harmonisation.

A l'ISO, la norme ISO/IEC 11801:1995 (1^{re} édition de mai 1995) est en cours de révision, notamment pour définir de nouvelles spécifications pour la catégorie 5/Classe D nécessaires au support du Gigabit Ethernet. Le document de référence sur ce point est l'amendement numéro 3 (FDAM3) en cours d'approbation. Cet amendement, ainsi que les amendements numéros 1 (changements mineurs) et 2 (concernant le câblage optique) seront intégrés à une nouvelle version de la 1^{re} édition à paraître fin 1999 sous la référence ISO/IEC11801 : 1999. Une 2^e édition de cette norme introduisant les spécifications des catégories 6 et 7 (composants du câblage) ainsi que des classes correspondantes E et F (pour les installations) est prévue pour l'année 2001. Le principal problème de ces 2 dernières spécifications est la nécessité de modifier la connectique pour satisfaire aux contraintes de diaphonie et pertes en retour. Même si un premier projet de nouveau dessin (présenté par la société Alcatel) de connecteur a été approuvé lors du meeting ISO/IEC de Berlin en juin 1999, il faut attendre la fixation de la normalisation de cette nouvelle connectique avant d'en envisager un déploiement.

A l'ANSI/TIA, le document de référence pour la catégorie 5 est l'ANSI/TIA 568-A. L'amendement numéro 5 référencé par le document ANSI/TIA 568-A-5 introduit pour les composants et l'installation une catégorie 5 E, suffisante pour le standard IEEE 802.3ab. À cette révision du standard 568-A, il faut ajouter le TSB-95 qui spécifie les méthodologies de test conformes aux spécifications de l'IEEE 802.3ab. Un projet de standard ANSI/TIA 568B est en chantier pour définir des catégories 6 et 7.

A l'IEC le principal document est l'IEC 61935-1 (en cours d'approbation) qui spécifie les méthodologies de test des systèmes de câblage définis dans la norme ISO11801. Ce document définit aussi les critères de conformité des appareils de test des systèmes de câblage.

Les nouveautés introduites par ces évolutions des standards sont donc de nouvelles mesures et des courbes limites plus contraignantes. À titre d'exemple on trouvera dans les tableaux ci-dessous un comparatif des valeurs proposées par la société Fluke à l'ISO/IEC fin août 1999.



**Pour un lien permanent
(de la prise RJ45 d'extrémité à celle d'un local répartiteur)**

Paramètre	Classe D	Classe D nouvelle	Classe E		Classe F		
Fréquences de test	1 à 100MHz	1 à 100MHz	1 à 250MHz		1 à 600MHz		
Valeurs des paramètres à	100MHz	100MHz	100MHz	200MHz	100MHz	200MHz	600MHz
Atténuation	23,2 dB	20,6 dB	18,5 dB	27,1 dB	17,7 dB	25,6 dB	46,6 dB
NEXT	24 dB	29,3 dB	39,9 dB	34,8 dB	62,9 dB	58,4 dB	51,2 dB
PSNEXT	-----	26,3 dB	37,1 dB	31,9 dB	58,1 dB	53,6 dB	46,4 dB
ACR	4 dB	8,7 dB	21,4 dB	7,7 dB	45,2 dB	32,8 dB	4,6 dB
PSACR	-----	5,7 dB	18,6 dB	4,8 dB	40,4 dB	28,0 dB	-0,2 dB
ELFEXT	-----	19,6 dB	24,2 dB	18,1 dB	> 30 dB	-----	-----
PSELFEXT	-----	17,0 dB	21,2 dB	15,1 dB	> 25,2 dB	-----	-----
RL	10 dB	12,1 dB	14,1 dB	12,0 dB	14,1 dB	12,0 dB	8,7 dB
Délai propagation	1000 ns	490 ns	490 ns	489 ns	453 ns	452 ns	451 ns
SKEW	-----	43 ns	43 ns	-----	18 ns	-----	-----

Pour un canal (Lien permanent + jarretières vers les équipements actifs)

Paramètre	Classe D	Classe D nouvelle	Classe E		Classe F		
Fréquences de test	1 à 100MHz	1 à 100MHz	1 à 250MHz		1 à 600MHz		
Valeurs des paramètres à	100MHz	100MHz	100MHz	200MHz	100MHz	200MHz	600MHz
Atténuation	-----	24,0 dB	21,7 dB	31,7 dB	20,8 dB	30,0 dB	54,6 dB
NEXT	-----	27,1 dB	39,9 dB	34,8 dB	62,9 dB	58,4 dB	51,2 dB
PSNEXT	-----	24,1 dB	37,1 dB	31,9 dB	58,1 dB	53,6 dB	46,4 dB
ACR	-----	3,1 dB	18,2 dB	3,0dB	42,1 dB	28,4 dB	-3,4 dB
PSACR	-----	0,1 dB	15,4 dB	0,1 dB	37,3 dB	23,6 dB	-8,2 dB
ELFEXT	-----	17,0 dB	23,2 dB	17,2 dB	> 29 dB	-----	-----
PSELFEXT	-----	14,4 dB	20,2 dB	14,2 dB	> 24,2 dB	-----	-----
RL	-----	10,0 dB	12,0 dB	9,0 dB	12,0 dB	9,0 dB	4,2 dB
Délai propagation	-----	548 ns	548 ns	547 ns	503 ns	502 ns	501 ns
SKEW	-----	50 ns	50 ns	-----	20 ns	-----	-----

■ Comment spécifier un câblage actuellement ?

L'arrivée fin juin 1999 du standard Ethernet Gigabit sur paires torsadées (IEEE 802.3ab), a éclairci la situation car le prescripteur du système de câblage peut maintenant se fixer un objectif clair comme le support de l'IEEE 802.3ab. Cela qui permet potentiellement d'alimenter tous les postes de travail à un débit de 1 000Mb/s. Seuls quelques rares serveurs (sauvegarde, calcul intensif par exemple) pourront nécessiter dans un avenir proche des débits supérieurs. On peut donc en déduire que le niveau de performances à atteindre pour un câblage est actuellement la catégorie 5 E (suivant ANSI/TIA 568-A-5) ou catégorie 5/ classe D (suivant ISO 11801:1999). L'expérience montrant que les pertes de performances se produisent essentiellement lors de la mise en œuvre, le prescripteur peut choisir de spécifier les composants du câblage en catégorie 6 et l'installation en catégorie 5 E ou classe D. La marge d'erreur laissée à la mise en œuvre est ainsi plus grande. Le surcoût est très faible car tous les fabricants ont déjà anticipé les évolutions de standards et ont à leurs catalogues des composants certifiés en catégorie 6, qu'ils destinent à remplacer les composants catégorie 5.

On peut accompagner une telle prescription de quelques spécifications supplémentaires destinées à limiter encore les aléas de mise en œuvre. Par exemple on peut choisir des câbles dont les deux conducteurs d'une paire sont soudés, ou utiliser de connecteurs RJ45 inclinés vers la bas dans les bureaux (pour limiter le rayon de courbure des câbles qui y sont connectés). À titre d'exemple on trouvera ci-après les valeurs à spécifier basées sur les projets de standards de l'ANSI/TIA (version d'août 1999).

Les câbles devront être conformes au tableau de valeurs suivant :

Caractéristiques (en dB) des câbles catégorie 6 (ANSI/TIA août 1999)								
Fréquence (MHz)	Atténuation	NEXT pp	ACR pp	NEXT ps	ACR Ps	ELFEXT pp	ELFEXT ps	Return Loss
1	2.0	74.3	72.3	72.3	70.3	67.8	64.8	19.0
4	3.8	65.3	61.5	63.3	59.5	55.7	52.7	21.4
8	5.4	60.8	55.4	58.8	53.4	49.7	46.7	22.6
10	6.0	59.3	53.3	57.3	51.3	47.8	44.8	23.0
16	7.6	56.3	48.7	54.3	46.7	43.7	40.7	23.0
20	8.5	54.8	46.3	52.8	44.3	41.7	38.7	23.0
25	9.6	53.3	43.8	51.3	41.8	39.8	36.8	22.3
31.25	10.7	51.9	41.2	49.9	39.2	37.9	34.9	21.6
62.5	15.5	47.4	31.9	45.4	29.9	31.8	28.8	19.5
100	19.9	44.3	24.4	42.3	22.4	27.8	24.8	18.1
125	22.5	42.9	20.4	40.9	18.4	25.8	22.8	17.4
200	29.2	39.8	10.6	37.8	8.6	21.7	18.7	16.0
250	33.0	38.3	5.3	36.3	3.3	19.8	16.8	15.3

Les connecteurs devront être conformes au tableau de valeurs suivant :

Caractéristiques (en dB) des connecteurs catégorie 6 (ANSI/TIA août 1999)								
Fréquence (MHz)	Atténuation	NEXT pp	ACR pp	NEXT ps	ACR ps	ELFEXT pp	ELFEXT ps	Return Loss
1	0.0	94.0		90.0		83.1	80.1	30.0
4	0.0	82.0		78.0		71.1	68.1	30.0
8	0.1	76.0		72.0		65.1	62.1	30.0
10	0.1	74.0		70.0		63.1	60.1	30.0
16	0.1	69.9		65.9		59.0	56.0	30.0
20	0.1	68.0		64.0		57.1	54.1	30.0
25	0.1	66.1		62.1		55.2	52.2	30.0
31.25	0.1	64.1		60.1		53.2	50.2	30.0
62.5	0.2	58.1		54.1		47.2	44.2	27.1
100	0.2	54.0		50.0		43.1	40.1	23.0
125	0.2	52.1		48.1		41.2	38.2	21.1
200	0.3	48.0		44.0		37.1	34.1	17.0
250	0.3	46.1		42.1		35.2	32.2	15.0

Les liens permanents devront être conformes au tableau de valeurs suivant :

Caractéristiques (en dB) des liens permanents catégorie 5 E (ANSI/TIA août 1999)									
Fréquence (MHz)	Atténuation	NEXT pp	ACR pp	NEXT ps	ACR Ps	ELFEXT pp	ELFEXT ps	Return Loss	Return Loss (cordon de brassage)
1	2.0	64.2	62.2	60.0	58.0	60.0	57.0	17.0	25.0
4	4.0	54.8	50.8	52.0	48.0	48.0	45.0	17.0	25.0
8	5.7	50.0	44.4	47.1	41.4	41.9	38.9	17.0	25.0
10	6.4	48.5	42.1	45.6	39.2	40.0	37.0	17.0	25.0
16	8.1	45.2	37.1	42.2	34.1	35.9	32.9	17.0	25.0
20	9.1	43.7	34.5	40.7	31.5	34.0	31.0	17.0	25.0
25	10.3	42.1	31.8	39.1	28.8	32.0	29.0	16.3	24.0
31.25	11.6	40.6	29.0	37.5	25.9	30.1	27.1	15.6	23.1
62.5	16.7	35.7	18.9	32.6	15.9	24.1	21.1	13.5	20.1
100	21.6	32.3	10.7	29.3	7.7	20.0	17.0	12.1	18.0

■ Eléments sur l'évolution des systèmes de câblage

Pour augmenter le débit d'information sur un lien, il est nécessaire d'augmenter la fréquence des signaux transmis. Quand ce lien est un câble constitué de paires torsadées cela augmente exponentiellement la diaphonie, et l'atténuation. Cela réduit ainsi doublement la marge active disponible.



Les meilleurs câbles actuels sont ceux où chaque paire est écrantée individuellement, ce qui limite à son maximum le phénomène de diaphonie. Les nouveaux connecteurs sont aussi conçus pour assurer la continuité de cet écrantage autour des contacts. On arrive ainsi à la limite de ce qu'il est possible de faire pour limiter ce phénomène de diaphonie. Reste l'affaiblissement qu'il est difficile de diminuer sauf à augmenter la taille des isolants des conducteurs ce qui augmente la taille des câbles. Pour compenser l'affaiblissement on peut aussi imaginer augmenter la puissance des émetteurs, mais cela est contraire aux contraintes sur la limitation des rayonnements électromagnétiques qui tendraient plutôt à la diminuer. L'association de toutes ces contraintes donnera une limite ultime à la capacité de transmission du câblage sur paires torsadées. Pour dépasser cette limite, le câblage en fibre optique qui ignore le phénomène de diaphonie et n'émet pas de rayonnement électromagnétique prendra à coup sûr le relais.

■ Conclusion

S'il est toujours certain pour tout le monde que le câblage optique prendra un jour le relais du câblage sur paires torsadées, la spécification du standard Ethernet 1000BaseT, dont on peut espérer qu'il fonctionnera même sur d'anciens câblages catégorie 5 de bonne qualité (qui satisferont aux tests de la catégorie 5 E ANSI/TIA ou nouvelle classe D ISO 11801:1999) va stabiliser les choses pour quelques années en faveur du câblage capillaire sur paires torsadées. Cela laisse le temps aux acteurs de la standardisation du câblage sur paires torsadées de définir la nouvelle connectique permettant de garder de bonnes performances au-delà des 100 MHz. Le prochain événement significatif sera sûrement l'apparition de l'Ethernet 10 Gb/s dont la standardisation est commencée. Utilisé d'abord en cœur de réseau sur fibres optiques (pour écouler le trafic des postes de travail raccordés en Ethernet 1000BaseT), il le sera à terme vers les postes de travail. Comme toujours le coût respectif du câblage sur fibres optiques ou sur paires torsadées déterminera alors le choix qui devra être fait lors du déploiement de l'Ethernet 10Gb/s vers les postes de travail des utilisateurs.

■ Bibliographie

Câblage haut débit : Antoine Delahousse, Hermes, ISBN 2-86601-597-5, 1997

Serveurs web des organismes de standardisation :

www.iso.ch

www.tiaonline.org

www.eia.org

www.ansi.org

grouper.ieee.org/groups/802/3/index.html

www.gigabit-ethernet.org

Serveurs web des constructeurs d'appareils de test :

www.datacomtech.com

www.fluke.com/nettools

www.scope.com/whitepap, www.scope.com/standards/

www.microtest.com

www.wavetek.com