

	R&T – 2^{ème} année	
	UE3 – TR3	Année universitaire 2011-2012

Module TR3

Transport des données : PDH, SDH, WDM

Responsable : Frédéric LAUNAY

I. Table des Matières

Responsable : Frédéric LAUNAY	1
I. Table des Matières.....	2
Multiplexage de Transport SDH/PDH.....	3
Introduction.....	3
II. Généralités sur les Hiérarchies synchrones (xDH)	8
A. Organisation Générale des données.....	8
B. Les multiplexeurs.....	8
III. Les réseaux synchrones étendus PDH (G.703).....	12
A. Synchronisation des réseaux.	12
B. Différentes trames : Les formats Européens E1, E2, E3, E4.....	16
C. Conclusion.....	27
IV. La hiérarchie SDH/SONET (rec. G.707).....	28
A. Introduction.....	28
B. La trame SDH.....	30
C. Les trames de transport STM-n (Synchronous Transport Module) du SDH.....	36
D. Application : Insertion d'affluents dans une STM1.....	38
V. Architectures des réseaux et dispositifs de protections.....	43
VI. WDM.....	43

Multiplexage de Transport SDH/PDH

Introduction

Le réseau déployé en France est segmenté en fonction des différents besoins en débit, en bande passante, en distance de transmission, ... On distingue trois grandes catégories :

- Les réseaux longues distances (ou les WAN, Wide Area Network). Ce sont les réseaux déployés à l'échelle d'un pays ou d'un continent et dont les noeuds sont de très grands centres urbains.
- Les réseaux métropolitains (Metropolitan Area Network = MAN) qui correspondent aux réseaux mis en oeuvre dans une grande ville ou une agglomération et qui permettent de relier entre eux par exemple différents arrondissements.
- Les réseaux locaux (Local Area Network = LAN) encore appelés réseaux de distribution ou réseaux d'accès. Ils représentent le dernier maillon et finissent d'acheminer les informations à l'abonné. Ils sont donc plus courts et moins gourmands en capacité.

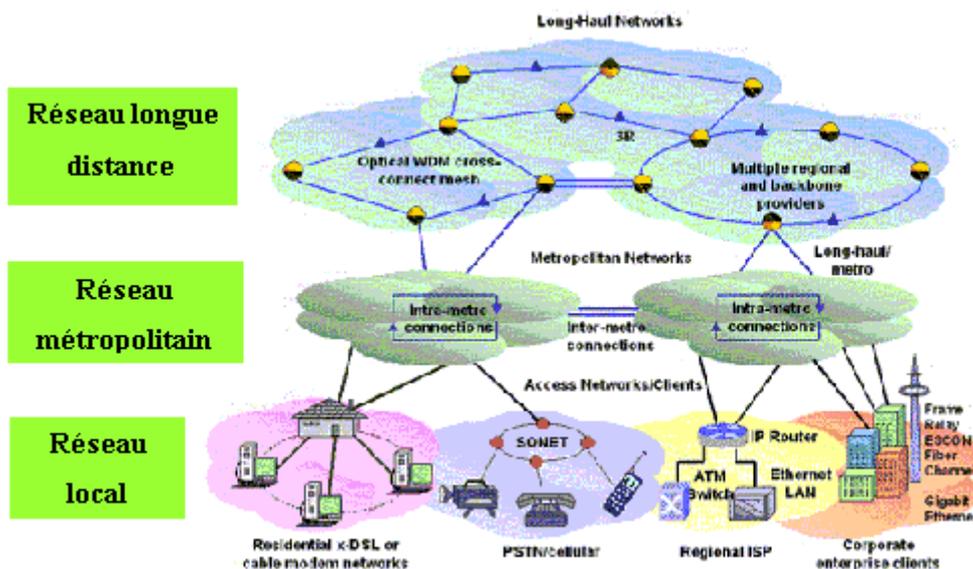


Figure n°1 : Architecture typique du réseau de télécommunications français.

En ce qui concerne le réseau téléphonique, on rappelle que c'est un réseau maillé structuré autour de commutateurs centraux (CL, CAA, CTS ou CTP) reliés entre eux par des supports physiques partagés (câble, fibre optique, ...). Les divers supports physiques ont des qualités intrinsèques en terme de débit, de bruit, de protection aux bruits, d'atténuations, ... mais représentent un coût non négligeable : Les réseaux longues et semi-longues distances (WAN et MAN) se caractérisent par l'importance des coûts de réalisation des supports physiques de transport alors que dans un réseau local (LAN) les lignes utilisées sont assez courtes (quelques kms) mais les travaux de voirie sont de couts non négligeable. Les prix de revient de l'exploitation d'une ligne sont répartis entre :

- voirie (terrains particuliers, différentiel de température élevé, villes anciennes, ...)
- câbles très robustes dans les emplacements les moins exposés aux agressions
- placement de répéteurs, de régénérateurs

Ainsi, pour économiser le coût du réseau de transmission, plusieurs communications se partagent le même support physique et les utilisateurs sont connectés en mode point à point via des multiplexeurs. Les communications analogiques sont en général multiplexées en fréquence (FDM) alors que les communications numériques sont multiplexées dans le temps TDM. L'arrivée de la fibre optique a permis d'atteindre des performances de plusieurs centaines de Mbits/s jusqu'à des dizaines de Gbits/s par un multiplexage en longueur d'onde (WDM).

La numérisation du réseau téléphonique par la technique MIC (à titre d'exemple le RNIS ou des réseaux spécialisés comme transpac) a permis de définir (et de normaliser) plusieurs niveaux de multiplexage. Le premier niveau de la hiérarchie est appelé débit primaire (E1 en Europe ou DS1 en Amérique). Ensuite, le multiplexage dans le réseau de transport de haut débit consiste à associer ou regrouper des débits incidents ou primaires au niveau des commutateurs centraux pour former un débit supérieur qui soit plus facile à transmettre et à gérer dans le plan de transmission. Le regroupement s'effectue dès que possible avec comme objectif de partager au moindre coût les supports physiques de transmission. La fonction de multiplexage s'introduit donc naturellement au sein du réseau téléphonique pour réaliser cet objectif. Il existe deux hiérarchies de multiplexages numériques :

- Le PDH : Plesiochronous Digital Hierarchy
- Le SDH : Synchronous Digital Hierarchy.

Le PDH a constitué la base de tous les réseaux de transport jusqu'aux années 1990. La hiérarchie numérique plésiochrone (Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH / DS_n) a été mise en place en parallèle à la numérisation du réseau RTC (POTS en Amérique) pour répondre principalement à la demande de la téléphonie. Les réseaux PDH/DS_n ont été développés à une époque où les transmissions point par point représentaient l'essentiel des besoins. L'évolution du réseau de transport haut débit est marquée par l'introduction des techniques synchrones (SDH). Fondée sur un réseau de distribution d'horloge, la hiérarchie synchrone garantit la délivrance de bits en synchronisme avec une horloge de référence. Elle autorise de plus des débits plus élevés et répond à un besoin de normalisation des fibres optiques.

Cependant, la hiérarchie PDH reste malgré tout aujourd'hui la technologie dominante sur la plupart des réseaux de télécommunications du monde, même si elle est en train d'être remplacée progressivement par la hiérarchie numérique synchrone (Synchronous Digital Hierarchy, SDH) en Europe ou la technologie SONET (Synchronous Optical Network) en Amérique. En effet, si les cœurs de réseaux sont aujourd'hui SDH, la distribution des débits chez l'utilisateur repose sur la hiérarchie plésiochrone.

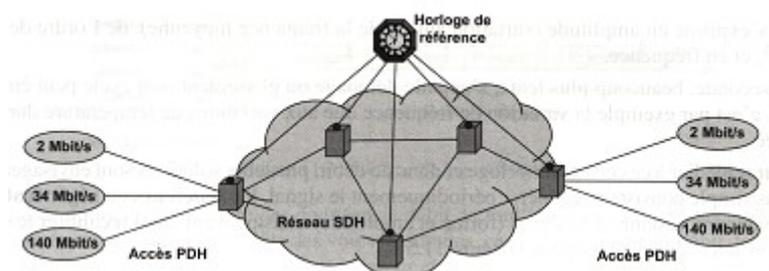


Figure n°2 : Cohabitation des techniques PDH/SDH (Claude Servin : Réseaux et Telecom)

Le PDH et SDH assurent le synchronisme temporel et un retard minimum sur les données transmises. Le XDH est donc dévolus aux applications à **débits constants**. Une autre procédure d'acheminement de données a été établis au CNET de Lannion, qui présente la particularité **d'être modulable en temps réel entre les flux de données synchrones**, à débits **constant et sans régulation de flux, et les flux de données à débits variables pourvus de la régulation de flux**. Il s'agit de l'ATM.

Le SDH n'est pas adapté à des débits variables, ce n'est pas un réseau en mode paquet comme Internet. **La SDH fourni une bande passante attribuée pour la voix ou la donnée**. Pour modifier le débit, il est nécessaire de disposer d'une commande extérieure qui alloue dynamiquement les canaux de transmission aux besoins de chacun ; il y a soit un opérateur à chaque nœud de réseau, soit un réseau complémentaire de commande et de contrôle.

1. Le réseau longue distance (WAN)

Cette partie du réseau, parfois également appelée réseau structurant, représente la couche supérieure du réseau de télécommunications. Elle est comprise entre deux autocommutateurs à autonomie d'acheminement, qui ont pour rôle d'aiguiller les informations d'une région à une autre, de la zone de l'expéditeur vers celle du destinataire. La transmission de ces informations se fait désormais sur fibre optique à une longueur d'onde de $1,55\mu\text{m}$ et à un débit élevé qui ne cesse de s'accroître (les débits 2,5 Gbits/s et 10 Gbits/s sont déjà installés et le 40 Gbits/s le sera très prochainement).

Cette capacité ne pourrait être atteinte sans l'introduction des fibres optiques dans la chaîne. Elles ont permis de gagner en débit et en espacement entre répéteurs par rapport aux systèmes existants, à savoir le câble coaxial (la distance passe typiquement de 2 à 100 km). De plus, l'abandon des régénérateurs électro-optiques (photodétection, amplification électrique, reconversion optique) au profit des amplificateurs optiques, déployés environ tous les cent kilomètres, a permis de faire un bond en terme de capacité des liaisons. Dès le début des années 1990, l'amplification optique a permis de démontrer la possibilité de transmettre, sans répéteur, des signaux à 5 et 10 Gbits/s sur des distances transocéaniques. La liaison du réseau longue distance est désormais tout optique.

2. Le réseau métropolitain (MAN)

Encore appelé réseau intermédiaire, le réseau métropolitain connaît en ce moment un véritable essor. Déployé entre le dernier autocommutateur à autonomie d'acheminement du réseau longue distance et une zone plus précise (arrondissement, campus, petite ville, ...), il possède un environnement souvent très complexe et divers. Fondamentalement, on peut distinguer les réseaux métropolitains structurants et métropolitains d'accès (Figure I- 2).

Les réseaux métropolitains structurants sont généralement constitués d'anneaux de 80 à 150 km de circonférence avec six à huit noeuds. En revanche, les réseaux métropolitains d'accès sont des anneaux de 10 à 40 km de circonférence dotés de trois ou quatre noeuds avec des embranchements vers des sites distants. Suivant les réseaux ou les pays, ces chiffres peuvent varier considérablement. En particulier, il existe des différences notables entre les zones très peuplées d'Europe et d'Asie, où les distances seront inférieures, et les Etats-Unis où les applications métropolitaines s'apparentent à de véritables réseaux régionaux.

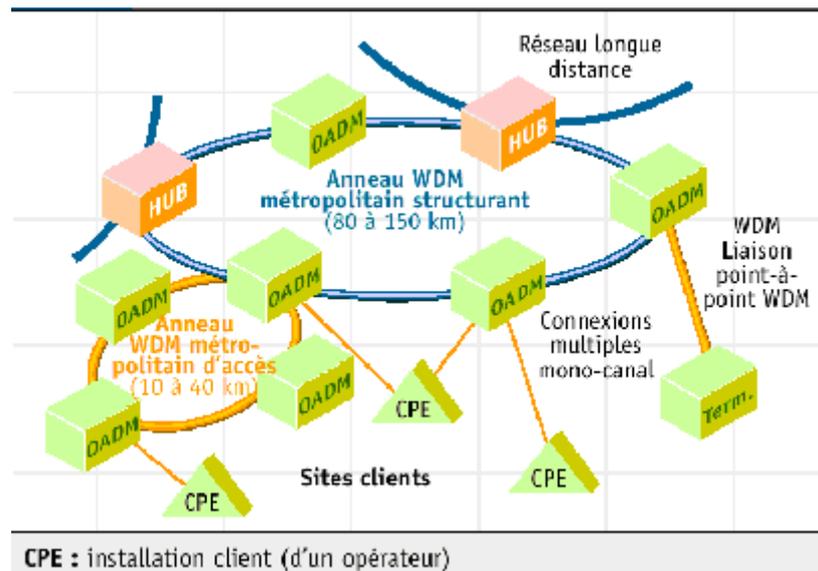


Figure I- 2 : Réseau métropolitain structurant et réseau métropolitain d'accès.

Les topologies logiques (profils de trafic) des réseaux métropolitains diffèrent radicalement de celles des réseaux longue distance. Ces derniers correspondent pour l'essentiel à des lignes interurbaines point à point avec tout au plus un ou deux multiplexeurs d'insertion-extraction optiques (OADM) pour insérer et extraire le trafic en des points intermédiaires. Les réseaux métropolitains introduisent une infrastructure optique à haut degré de connectivité. Les anneaux métropolitains se caractérisent généralement par un trafic maillé avec un certain degré de concentration lié à l'interconnexion avec le réseau longue distance. Les anneaux d'accès, à la différence, collectent en général le trafic de plusieurs noeuds pour le concentrer vers un noeud partagé avec un réseau métropolitain structurant.

La complexité de ce réseau ne se traduit pas uniquement par le haut degré de connectivité. A la différence des réseaux longue distance, les réseaux métropolitains doivent prendre en charge des formats, des protocoles et des débits de transmission très divers, mêlant les trafics de la hiérarchie numérique synchrone (SDH) ou du réseau optique synchrone (SONET) ou autres encore. Pour supporter cette diversité, ces réseaux sont souvent équipés de cartes transpondeurs multidébits universelles, acceptant n'importe quel débit de 100 Mbits à 2,5 Gbits/s, pouvant assurer ultérieurement le trafic à 10 Gbits/s sans modification (exemple du récent réseau Alcatel 1696 Metro Span), et dans une transparence totale vis-à-vis de tous les formats et protocoles.

Dans ces réseaux intrinsèquement ouverts à n'importe quel type de signal, le multiplexage en longueur d'onde (WDM), dont une description ultérieure sera faite, trouve une application importante en luttant contre l'encombrement que cela peut procurer tout en réduisant le coût par service apporté. De la même manière, les amplificateurs optiques sont essentiels pour les applications de réseaux métropolitains structurants. Les pertes élevées dans la fibre (dues à l'interconnexion de courts tronçons de fibre) et le cumul des pertes associées aux transits tout optiques dans des noeuds successifs peuvent imposer en effet d'amplifier le signal optique. L'amplificateur optique peut représenter dans bien des cas une solution à moindre coût comparée à la régénération optique-électrique-optique.

3. Le réseau local (LAN) [3]

Il est également nommé réseau de distribution ou d'accès. C'est la dernière partie du réseau de télécommunication, celle qui relie l'abonné et le dernier autocommutateur. Sa longueur varie de 2 à 50 km et sa capacité est au plus du même ordre de grandeur que celle du réseau métropolitain.

Il est toujours constitué par une partie en fibre optique entre l'autocommutateur et la terminaison de réseau optique suivie d'une partie en conducteur métallique qui va jusqu'au terminal de l'abonné. Cependant, il est de plus en plus envisagé dans l'avenir de réduire la contribution de l'électrique pour aller vers le tout optique dans le but d'augmenter le débit disponible chez l'abonné.

Selon la localisation de la terminaison optique, différentes configurations sont envisageables :

- FTTH/FTTO (Fiber To The Home / Fiber To The Office) : la terminaison de réseau optique, qui est propre à un abonné donné, est implantée dans ses locaux. La fibre va donc jusqu'à son domicile ou son bureau, et la partie terminale en cuivre est très courte.
- FTTB (Fiber To The Building) : la terminaison de réseau optique est localisée soit au pied de l'immeuble, soit dans un local technique généralement situé en sous-sol, soit dans une armoire ou un conduit de palier. Elle est partagée entre plusieurs abonnés qui lui sont raccordés par des liaisons en fil de cuivre.
- FTTC/FTTCab (Fiber To The Curb / Fiber To The Cabinet) : la terminaison de réseau optique est localisée soit dans une chambre souterraine, soit dans une armoire sur la voie publique, soit dans un centre de télécommunications, soit sur un poteau. Selon le cas, il est envisagé de réutiliser le réseau terminal en cuivre existant ou de mettre en oeuvre une distribution terminale par voie radioélectrique.

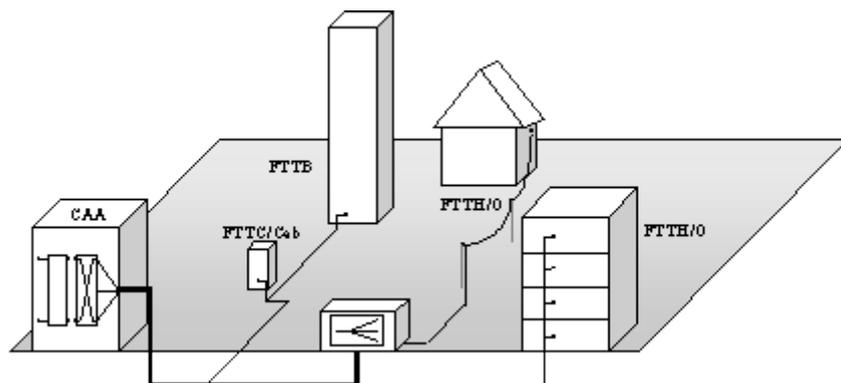


Figure I- 3 : Le réseau local français.

L'objectif principal de ce cours est de comprendre la gestion du réseau filaire. Pour cela, nous allons aborder différents principes :

- Définir et comprendre le rôle des multiplexeurs
- Mettre en avant les problèmes inhérents au multiplexage
- Lister les différentes normes de multiplexages

II. Généralités sur les Hiérarchies synchrones (xDH)

A. Organisation Générale des données

Rappel sur la numérisation du réseau Téléphonique

La modernisation du réseau téléphonique commuté s'est conçue en numérisant les signaux analogiques de la voix. La bande passante étant de 300 Hz à 3400 Hz, pour respecter la condition de Nyquist, la voix est échantillonnée à $f_e=8$ kHz, soit $T_e=125\mu s$.

L'échantillonnage correspond à la transformation du signal analogique en un signal numérique. L'amplitude de chaque échantillon est quantifiée à la valeur la plus proche, et est représentée par un nombre codé sous forme binaire par le biais d'une modulation MIC G.711. On échantillonne le signal à 8 kHz puis on convertit les échantillons en données numériques sur 8 bits, soit un débit par voix de 64 kHz.

Pour transiter plusieurs appels téléphoniques sur un même câble, on opère un multiplexage temporel : le signal MIC d'une voix n'a pas la nécessité d'occuper le canal de transmission pendant la totalité du temps entre deux échantillons. On transmet ce signal sur une durée très courte par rapport au temps séparant deux échantillons ($125\mu s$), ce qui permet d'entrelacer, dans l'intervalle de temps inoccupé d'autres communications.



Organisation de la trame MIC primaire E1.

Le système MIC normalisé par les Européens est appelé MIC E1 (Européen, 1^{er} Niveau). La normalisation s'est arrêtée sur la transmission de 30 voies de données plus deux voies annexes appelées voies d'information par multiplexage temporel. On divise donc l'intervalle séparant 2 échantillons successifs pour une voie par 32 Intervalles de Temps égaux par l'aide de Multiplexeur

B. Les multiplexeurs

Le multiplexeur est un équipement qui permet de mettre en relation plusieurs utilisateurs, à travers une liaison partagée, en point à point.

Il s'agit d'une méthode de gestion de l'information physique qui permet à un canal de transporter des informations de plusieurs sous canaux, et en full duplex.

Un multiplexeur n voies simule sur une seule ligne n liaisons points à points. Chaque voie d'entrée et de sorties est appelée voie incidente. Le multiplexage des voies, c'est-à-dire la voie véhiculée par le support partagé est appelée voie composite.

Le partage de la voie composite peut être un partage de la bande disponible (spatial : en fréquence ou en longueur d'onde), ou un partage temporel, c'est-à-dire chaque signal utilise durant un temps prédéterminé toute la bande utile de la voie composite. Les multiplexeurs temporels relient par scrutation une voie incidente en entrée à une voie incidente en sortie durant un intervalle de temps prédéterminé, appelé IT.

Les signaux entrants (canal 1 à canal n) qui seront multiplexés sont appelés les affluents (tributary). Dans cette première figure, le système transporte des bits, le multiplieur n'interprète pas les données qu'il transporte, il est dit transparent au protocole. L'arrivée des données est indépendante du fonctionnement du multiplieur : les informations qui arrivent pendant la période de scrutation des autres voies sont mémorisées dans un tampon (buffer).

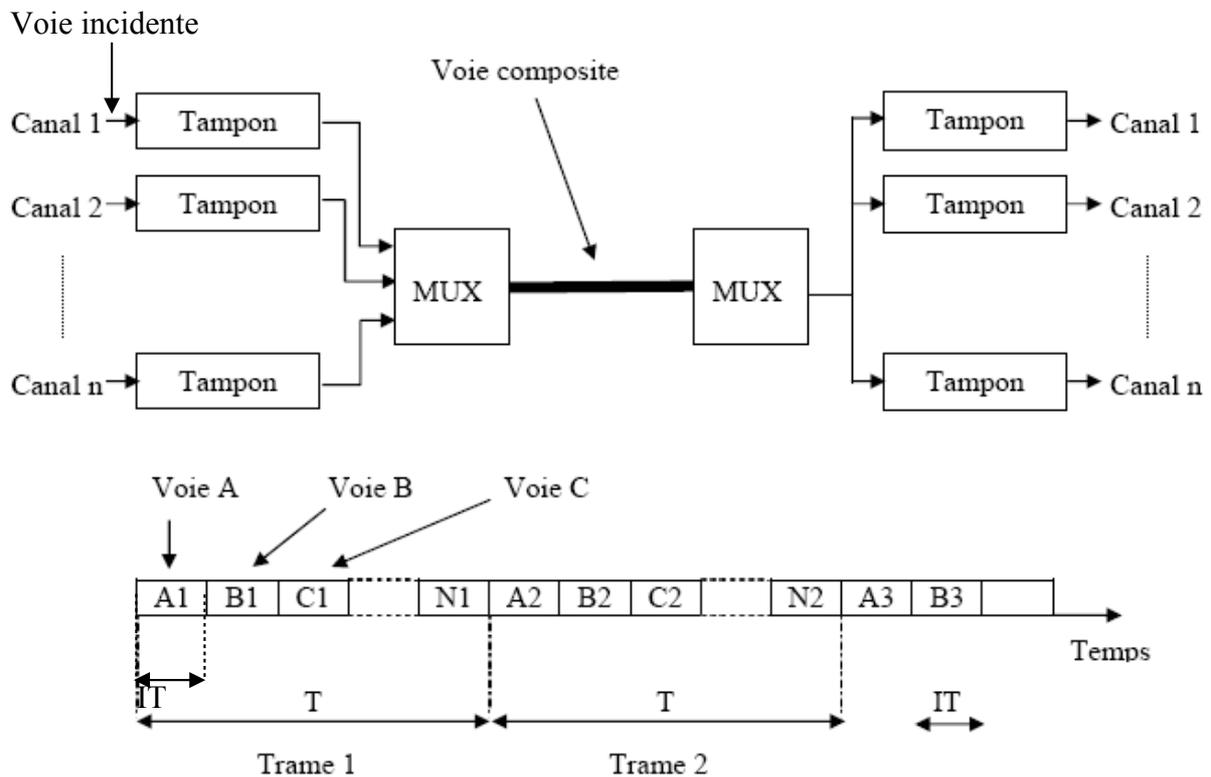


Figure n°3 : Exemple de multiplexage temporel

Multiplexage bit à bit

Le multiplexage bit à bit consiste à insérer un bit de chaque voie (A_k, B_k, \dots, N_k représente un seul bit). En appelant trame, le motif élémentaire qui contient les informations de chacune des voies, chaque trame reçoit donc un bit de chaque canal avec une durée identique. Le bit N_k sera retardé par rapport au bit A_k , mais ce décalage est faible. La resynchronisation est permise par le biais de tampon.

Multiplexage octet par octet

Le fonctionnement est identique au multiplexage bit par bit, on insère maintenant un octet de chaque canal entrant. Les informations A_k, \dots, N_k de chaque trame sont donc composées de 8 bits

Restitution des données

Le transport de données s'effectue par blocs de données, nommés trames. Les trames se suivent sans interruption, en substituant le manque de données (quand il n'y a rien à transmettre) par des bits de bourrage. Les trames comportent de zones principales de données :

- La zone d'information ou données de services, avec un contrôle de la qualité de transport
- Les données transportées, désignées souvent par charge utile.

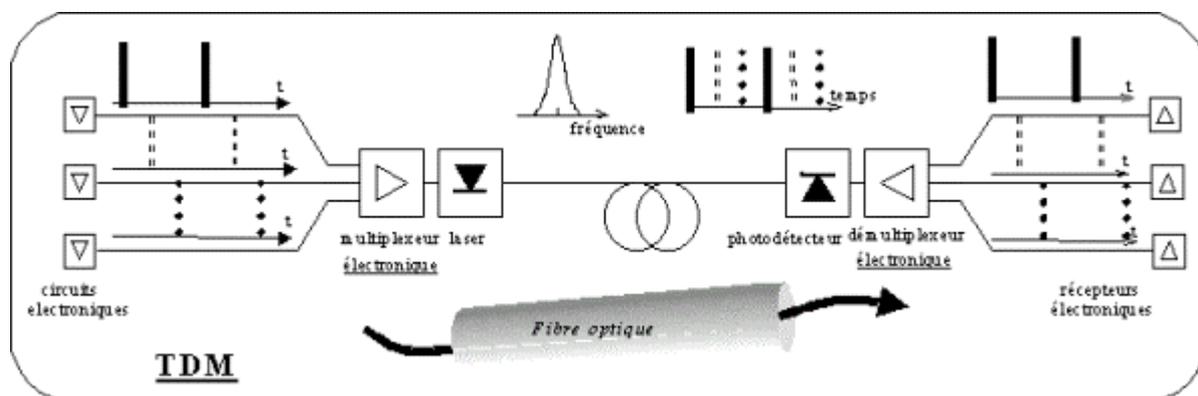
Une deuxième organisation se définit par un ensemble de trames (une **multitrame**) dans laquelle **les informations de service sont réparties sur plusieurs trames**.

La synchronisation du récepteur nécessite la réception complète d'une multitrame.

Les données de service assurent principalement :

- La détection du bloc de transport, sa position dans le flux de bits ; cette fonction est appelée verrouillage de trame
- Les informations d'identification des trames et/ou des multitrames
- Les informations d'exploitation
- Les informations de maintenance
- Les informations de signalisation entre équipements (ex : Multiplexeur, démultiplexeur).

Les hiérarchies synchrones consistent à multiplexer et à transporter des éléments de débit inférieur en les transmettant à des débits supérieurs. Il existe différents moyens de multiplexer des données, par exemple un multiplexage fréquentiel ou temporel. Dans la hiérarchie PDH et SDH, le multiplexage est temporel.



La restitution des différentes voies nécessite l'identification de celles-ci. Un IT de signalisation permet d'identifier le début de la trame, d'assurer la synchronisation de la lecture des différentes voies et de positionner les voies incidentes. L'ensemble des différentes voies et des IT de synchronisations forme la trame multiplexée, encore appelée multiplex. On trouve ainsi le cas pour une trame E1 constitué de 30 ITs d'informations (30 voies incidentes) et deux IT de signalisation.

Les débits inférieurs sont ainsi élevés à une valeur supérieure avec une indication de leur présence dans la trame résultante (signalisation). Le débit n'est donc pas exactement le multiple de ce qui rentre mais légèrement plus. Afin d'illustrer ce propos, on se reporte aux figures 3 et 4 sur lesquelles le débit réel est de 2048 kbit/s pour un multiplexage de 30 voies à 64 kbit/s. Ce choix de 64 kbit/s est basé sur la numérisation de la ligne téléphonique (cf.

RNIS). Pour rappel, le traitement de la parole produit une suite d'échantillons (procédé MIC) codé sur 8 bits toutes les 125 μ s. Entre deux mots de 8 bits, il est possible d'insérer des mots provenant d'autres voies (Recommandation G711). Le multiplexage des différentes voies dans une trame s'effectue en respectant toujours le même ordre d'émission. La trame est ainsi composée d'intervalles de temps élémentaire (IT ou timeslot) dans lequel se trouve un octet (8 bits). Pour un utilisateur, chaque IT lui correspondant est séparé périodiquement de 125 μ s. En Europe, la trame est composée de 32 IT dont deux sont utilisés pour la signalisation, le Japon et l'Amérique du Nord émettent quant à eux 24 IT dans la trame auquel il faut rajouter un bit de verrouillage de trame (soit un total de 193 bits par trame). Il s'agit du premier niveau de multiplexage, normalisé par l'avis G.704 de l'UIT.

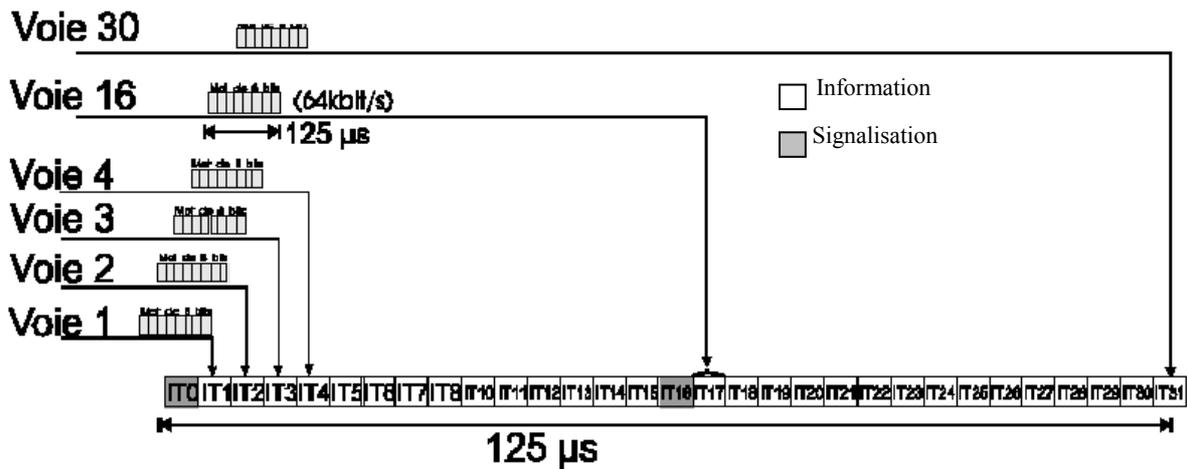


Figure n°4 : Structure de la trame E1-MIC (Standard européen)

Le Japon, l'Amérique du Nord et l'Europe ont défini des standards différents en terme de multiplexage temporel primaire. Cette différence va générer des standards propres à chaque niveau de multiplexage (E1 à E4 en Europe et DS1 à DS3 en Amérique du Nord). Sur la figure 4, nous représentons le nombre de voies utiles multiplexées et les débits réels correspondant.

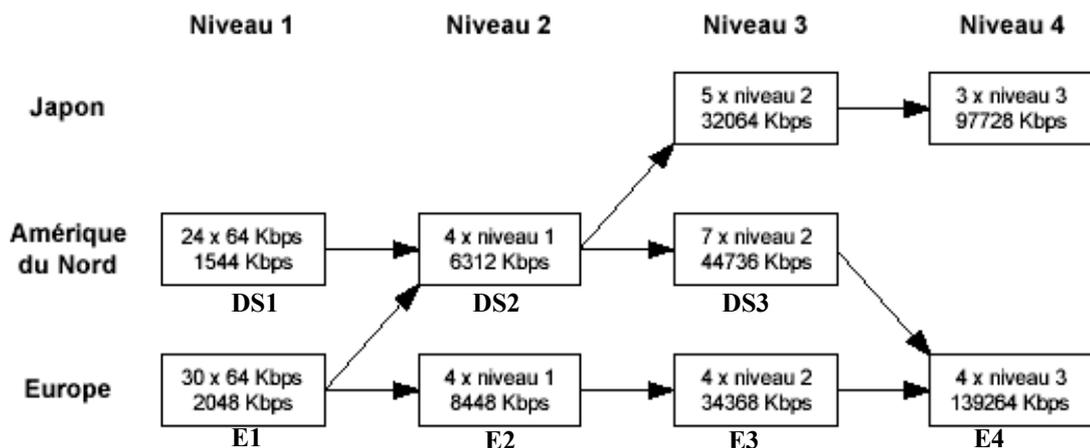


Figure n°5 : Hiérarchisation plésiochrone PDH

Le principe de multiplexage plésiochrone étant de construire des débits supérieurs directement à partir du débit inférieur, on obtient les débits de base de 2.048, 8.448, 34.468, 139.264 Mbit/s en Europe et 1.544, 6.312 et 44.736 Mbit/s en Amérique du Nord. Des interfonctionnements 2048 vers 6312 et 44736 vers 139264 Mbit/s sont prévus par la norme.

Multiplexeur à insertion-extraction

Ce multiplexeur permet d'extraire ou d'insérer des flux déjà multiplexé. Il comporte un circuit de démultiplexage pour extraire les affluents entrant ; des entrées, sorties d'affluents (à insérer ou extraire) et un multiplexeur pour reconstituer un multiplex principal de même débit.

Répartition et Brassage

Le répartiteur se trouve en bout de chaîne. Il n'a pas de fonction de retransmission (routage), il se charge de multiplexer N canaux de débit primaire vers un débit plus élevé.

C'est un dispositif permettant de répartir les fils de cuivre composant les lignes d'abonnés entre les câbles reliés au commutateur d'abonnés et dont la fonction est de regrouper plusieurs lignes sur un même câble.

Le Brassage consiste à établir et modifier les connexions.

III. Les réseaux synchrones étendus PDH (G.703)

A. Synchronisation des réseaux.

Le cas précédent (figure 2) peut être considéré comme un cas idéal dans le sens où l'on suppose que le débit affecté à chaque voie incidente est strictement identique et que les données sont parfaitement synchronisées.

Or, chaque voie est référencée vis-à-vis d'une horloge interne qui est soit fournie par un oscillateur soit asservie sur une horloge de référence. Que ce soit au niveau trame ou affluent, chaque information est véhiculée à un débit fixé par la fréquence de fonctionnement de l'horloge de la voie incidente. Les affluents sont alors dits plésiochrones (du grec plésio presque) puisque les horloges sont proches mais non identiques.

De plus, même lorsque les différentes horloges du réseau (c'est-à-dire les horloges de chaque voie incidente) sont asservies par une horloge de référence, des écarts d'horloge subsiste et sont aujourd'hui la principale source d'erreur dans le réseau (saut de bits). Il est par conséquent nécessaire avant de multiplexer les données, de corriger les horloges de chaque voie.

Phénomène de Gigue

Il existe deux altérations qui ont pour conséquences de modifier la fréquence d'horloge autour de sa valeur moyenne et donc d'apporter des variations de phase autour d'une valeur moyenne : la gigue ("jitter") est une variation rapide de la fréquence autour de la fréquence moyenne et le dérapage ("wander") représente une variation lente (ex : due au changement de température).

La gigue de fréquence est une variation de la fréquence autour d'une fréquence moyenne. La gigue est due aux techniques mises en œuvre dans les équipements de multiplexages/démultiplexage, elle représente une faible fluctuation de la phase. Elle est définie comme les

variations des impulsions électriques du signal codé par rapport à sa position idéale dans le temps (figure 5). Les impulsions ne sont plus à leur place et les intervalles de temps entre impulsions varient également.

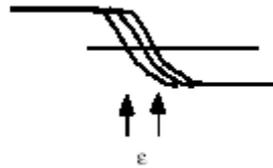


Figure n°6 : Gigue du signal

L'écart de positionnement est mesuré par l'**amplitude** de gigue ou une variation de phase. L'amplitude est spécifiée par rapport à l'intervalle unitaire (UI = Unit Interval) qui est l'intervalle de temps T entre 2 impulsions d'un signal de référence sans gigue (dans le cas du système 2 Mbit/s, UI = 488 nsec). La gigue est aussi spécifiée en degrés, un UI étant alors égal à 360° . L'amplitude de gigue varie au cours du temps de manière aléatoire. Les variations typiques de gigue ont une fréquence de l'ordre de 10 Hz jusqu'à quelques kHz. Les régénérations et les opérations de multiplexage et de démultiplexage sont les principales sources de gigue dans le réseau. Les qualités des signaux, dont les mesures sur la gigue, sont définies dans les recommandations G.821 à G.826.

Le dérapage (wander) est une gigue basse fréquence (< 10 Hz) qui est due à des facteurs environnementaux (e.g. différences de température sur la longueur d'un chemin de transmission). L'erreur est plus importante que la gigue.

La gigue et le dérapage doivent être maintenus dans des limites spécifiées (voir Rec .UIT e.g. G.823) car ils induisent des glissements ("slips"=perte de trame) dans les commutateurs. Ces considérations font qu'un terminal de commutation **contient un module de synchronisation** dont le rôle est d'aligner les trames des affluents incidents (*bit de justification*). Le module de synchronisation est lui même **précédé d'un terminal de jonction** qui assure la formation du signal HBD3 et la **régénération** du signal reçu.

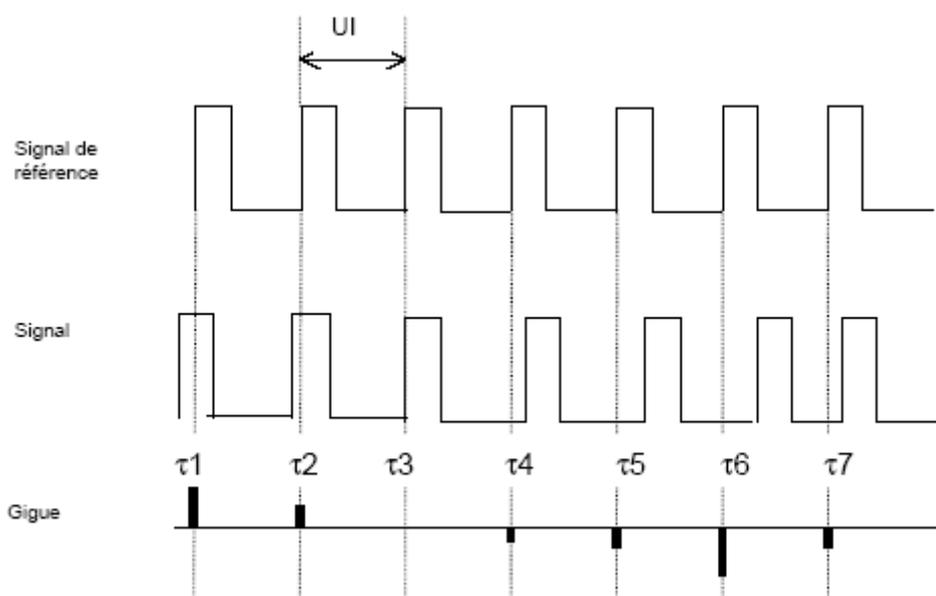


Figure n°7 : Représentation de la gigue

📄👉 Réalisation pratique du multiplexage plésiochrone

Pour remédier aux écarts d'horloges et de débits, la solution retenue comme indiquée précédemment est de régénérer le signal reçu pour reconstituer le signal à la fréquence moyenne (figure 7) et de synchroniser les données.

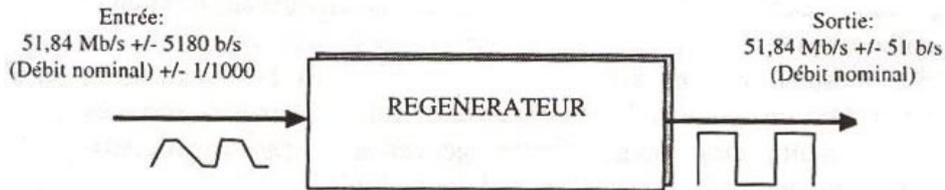


Figure n°8 : Régénération

La suppression de la gigue peut s'effectuer dans un répéteur pourvu d'un dispositif de lissage de fréquence et de mémoires tampons suffisantes. La gigue représentant une variation en fréquence de l'horloge autour de la fréquence nominale, l'horloge source est tantôt supérieure, tantôt inférieure à l'horloge d'émission. Par conséquent le débit du signal entrant est parfois supérieur au débit sortant. Dans ce cas, il est nécessaire de stocker les bits excédentaires en attente d'une dérive opposée de l'horloge. Toutefois, pour limiter la taille des mémoires tampons élastique, l'UIT a imposé une dérive d'horloge maximale de 10^{-6} ppm.

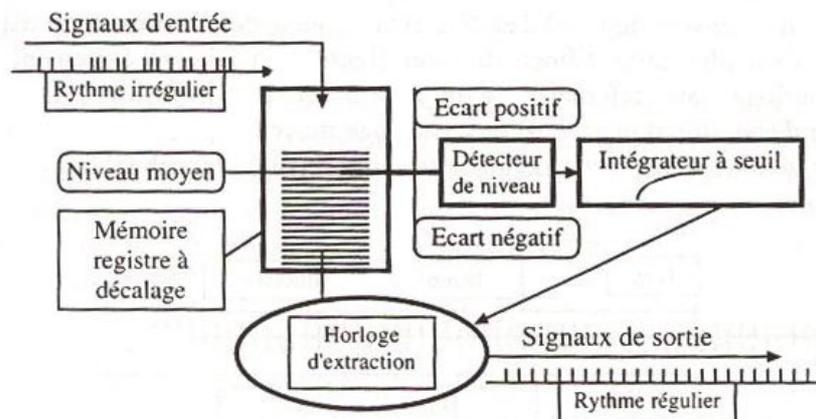


Figure n°9 : Lissage de fréquence.

Cependant le dispositif de régénération est insuffisant puisque d'une part ce dispositif (mémoire) introduit un retard (temps de rétention des bits) et que d'autre part, les bits sont reçus à la vitesse de la fréquence d'entrée. Or, supposons que la fréquence d'entrée soit, de par la gigue, plus rapide que la fréquence de sortie, alors l'horloge de sortie n'a pas la vitesse suffisante pour ré-emettre tous les bits reçus dans l'instant considéré.

Le problème est résolu en mémorisant les bits en surnombre, en attendant une fréquence d'entrée inférieure à la fréquence de sortie.

Pour résumer, afin de multiplexer les données il est nécessaire d'effectuer différentes opérations :

- utilisation de mémoire-tampon ("buffer store, elastic store") couramment de 32 octets afin d'effectuer la justification dans le module de synchronisation

Pour la synchronisation, les deux opérations résultantes sont

- chaque affluent inscrit ses données à son débit D_i dans la mémoire
- le multiplex lit avec un débit D_o , rythme de l'horloge locale de l'auto-commutateur. Il y a alors 2 cas possibles :
 - o $D_o > D_i$: (lecture > écriture) : manque d'information à lire (ou relecture d'une info déjà lue)
 - o $D_o < D_i$: (lecture < écriture) : à un certain moment la mémoire est remplie, n'est pas lue à temps et est écrasée et donc perte d'info.

Ainsi, l'utilisation de la mémoire tampon permet d'aligner les trames par justification ou bourrage ("stuffing") : on insère régulièrement des bits non-significatifs dans le plus rapide des deux débits ; si $D_o > D_i$, on parle de justification positive sinon il s'agit d'une justification négative.

Pour clarifier la situation, considérons un signal affluent ayant un débit de X bits par seconde. Ce débit peut varier dans une plage $\pm \Delta x$ bit/s. On veut transporter ce signal dans une trame S dont la longueur est fixe L_T et la période est T_T . Pour cela on peut prévoir dans la trame de transport S une place L_n allouée à chacun des affluents. Cette place doit être suffisamment longue pour transporter le nombre de bits maximum que l'on peut obtenir pendant la durée T_T dans le cas particulier du débit le plus rapide $X + \Delta X$ bit/s. Dans ce cas, le nombre de bits reçus pendant l'intervalle de temps T_T est $(X + \Delta X) \cdot T_T$. Une longueur $L_n > (X + \Delta X) \cdot T_T$ pourra donc contenir tous les bits reçus et a fortiori on aura suffisamment de place pour contenir le nombre de bits reçus dans le cas d'un débit affluent plus lent : $(X - \Delta X) \cdot T_T$

L'opération permettant de transporter un signal de débit variable dans une trame S de longueur fixe L et de débit fixe L/T_T s'appelle la **justification**. Parmi les L bits de la trame S on distingue deux types de bits (les bits d'information à transmettre = bit I , et les bits de remplissage = bit R) et trois zones (zone pour les bits d'information, une zone pour les bits de remplissage positif, appelée zone P sur la figure 9, et une zone pour les bits de remplissage négatif, appelée zone N).

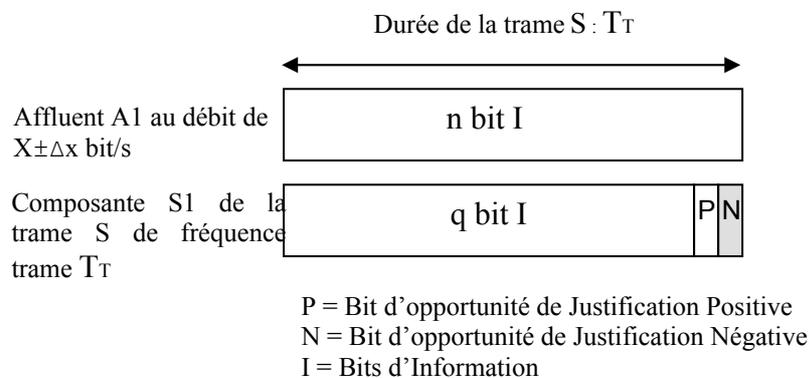


Figure n°10 : Justification

Trois possibilités:

- 1- Justification nulle : l'affluent a exactement le même débit L/T_T ($q+1$ bit en T_T), dans ce cas P est un bit d'information, N est rempli avec un bit quelconque dit bit de remplissage.
- 2- Justification positive : l'affluent est au débit $X+\Delta X$ ($q+2$ bit durant T_T). P et N sont remplis chacun avec un bit d'information de manière à compenser la variation $+\Delta X$.
- 3- Justification négative : l'affluent est au débit $X-\Delta X$, N et P sont des bits de remplissage.

B. Différentes trames : Les formats Européens E1, E2, E3, E4

Multiplexage MIC- E1 ou TN1 à 2 Mbit/s

La hiérarchisation définie en Europe pour les réseaux de transmission est à 4 niveaux (cf. Figure 1). Ainsi la recommandation G 732 adoptée en Europe fixe le débit à 2048 kbit/s. Chaque trame est définie par une durée de 125 μ s divisée en 32 IT numérotés de 0 à 31.

Au niveau Européen, les IT 1 à 15 et 17 à 31 sont dédiés aux transferts d'informations. Les autres IT servent à la signalisation :

- l'IT 0 des trames paires est réservé verrouillage de trame
- l'IT 0 des trames impaires est réservé au service (alarmes, ...)
- l'IT 16 est réservé à la signalisation

Une succession de 16 trames constitue une multiframe.

a) Structure et utilisation de l'IT0 (avis G.732)

L'IT0 est utilisé soit pour le verrouillage de trame (VT) pour les trames impaires, soit pour les services pour les trames paires. Dans le premier cas, les 8 bits de l'IT0 correspondants à la trame de verrouillage sont définis par la première ligne du tableau 1, et les 8 bits de la trame paire correspondant au service sont définis par la deuxième ligne du tableau :

	1	← Position du bit →						8
Trame avec VT	SI	0	0	1	1	0	1	1
Trame sans VT	SI	1	A	Sa4	Sa5	Sa6	Sa7	Sa8

Le premier bit S_i de l'IT0 est réservé pour usage international. Il est généralement dédié au contrôle des erreurs de transmission par la méthode CRC4 pour la trame de verrouillage. Lorsqu'il est utilisé pour la détection d'erreurs de transmission, le premier bit S_i porte lui-même une structure de multiplexage par entrelacement de bits. Cette structure s'étend sur 16 trames (soit une durée de 2 ms) qui portent alors le nom de multiframe CRC4 (figure 9).

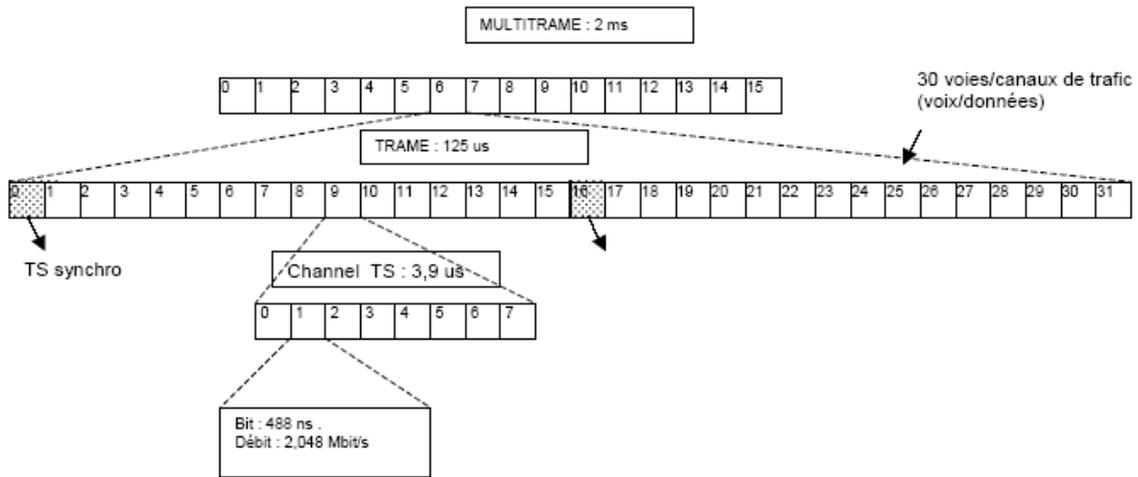


Figure n°11 : de l'IT à la multitrame

La procédure CRC a été conçue pour assurer une protection supplémentaire contre la recopie du contenu de la trame de verrouillage au niveau de la trame sans verrouillage et pour améliorer les possibilités de contrôle d'erreurs de transmission. Dans ce cas, la multitrame CRC4 se divise en deux sous-multitrames (composée de 8 trames chacune) appelées sous multitrame1 et sous multitrame2 (respectivement SMF1 et SMF2 en Anglais) dans laquelle est insérée le mot de contrôle.

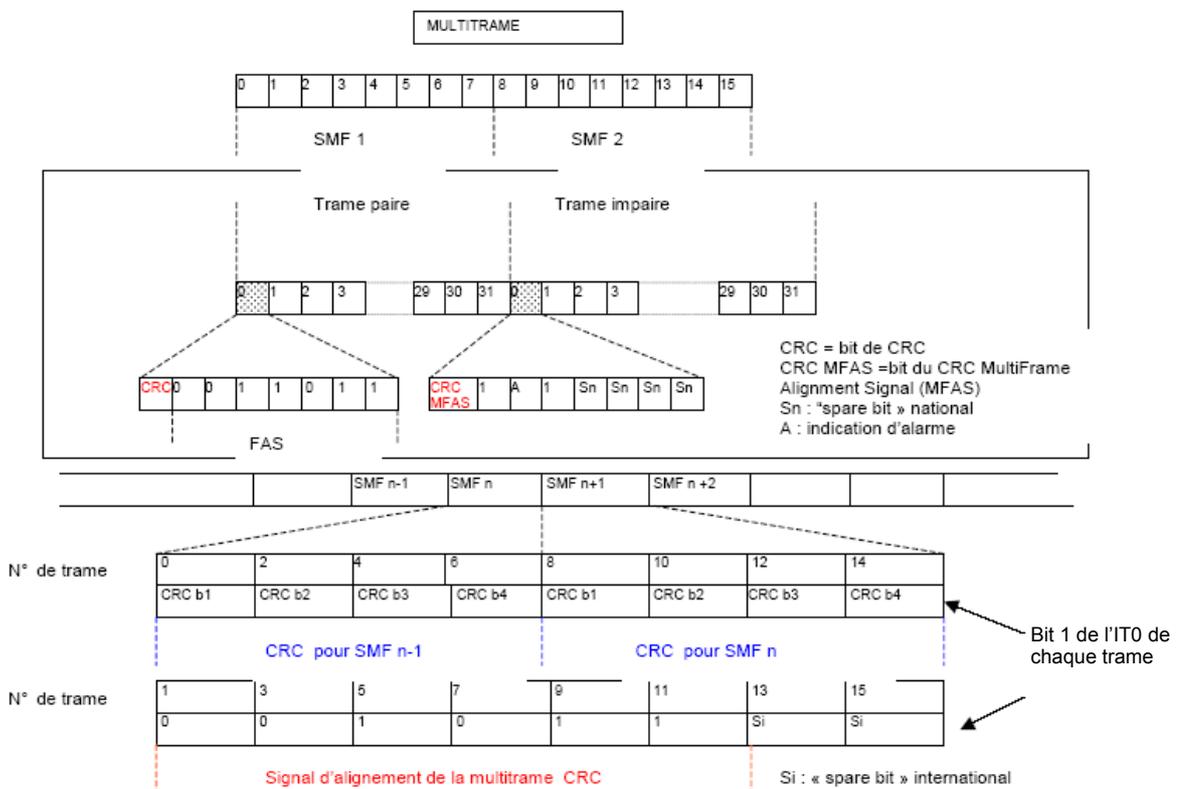


Figure n°12 : Décomposition de la multitrame en deux sous-multitrames

La figure 10 présente la structure de multitrame et les mots de contrôle C1 à C4. Chaque sous-multitrame transmet donc 4 bits de CRC-4, appelés C1, C2, C3 et C4 au niveau du premier bit

de l'IT0 des trames paires. Dans les trames qui ne contiennent pas le signal de verrouillage de trame, le bit 1 est utilisé pour transmettre le signal de verrouillage de multitrame CRC-4 à 6 bits (001011) ainsi que 2 bits d'indication d'erreur CRC-4 : E (nommée aussi Si). E (ou Si) indique la réception d'une multitrame erronée ; le délai pour communiquer cette erreur doit être inférieur à 1 s. Le mot CRC-4 de la sous-multitrame p est calculé à partir des bits de la sous-multitrame p-1 (reste de la division par un polynôme générateur). Donc, le motif de verrouillage de multitrame (001011) est ici entrelacé avec les deux mots de contrôle contenant chacun les 4 bits de CRC : C1, C2, C3, C4.

Le deuxième bit alterne de 0 à 1 entre trame pour éviter l'imitation (recopie) des deux trames IT0 consécutives.

Le mot de verrouillage codé sur 7 bits est présent une trame sur deux. L'alignement de la multitrame est assuré par un motif fixe réparti dans la multitrame (positions correspondant aux IT0 impairs) à partir de trois IT0 où on détecte VT, pas de VT, VT. Dans le cas où l'on perd le verrouillage, l'alarme A de l'IT0 de la trame sans VT prend pour valeur 1. Pour faciliter la compréhension, on représente la partie basse de la figure 10 de manière verticale (fig 11).

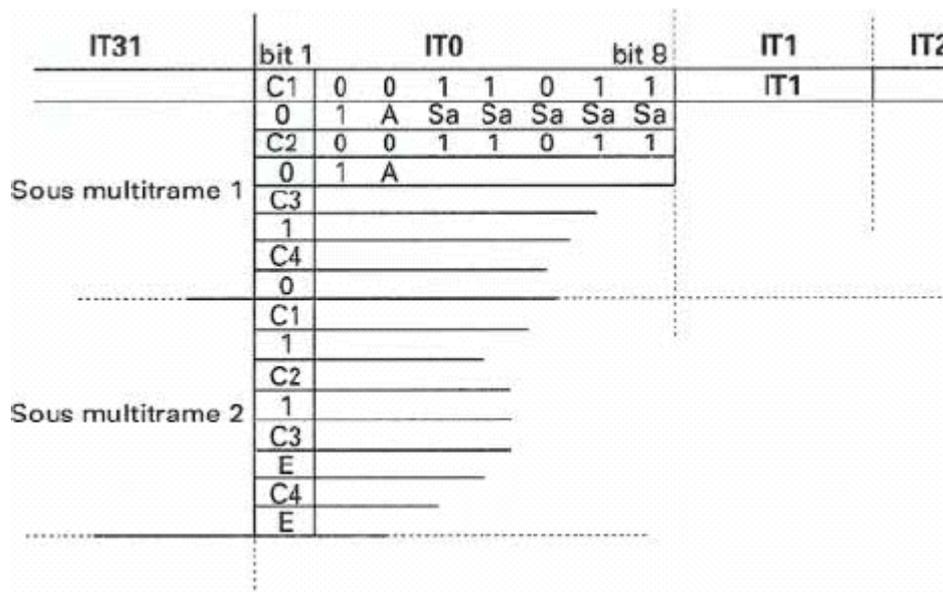


Figure n°13 : Multitrame CRC4 (technique de l'ingénieur [1])

Les bits restants (bit n°3 à 8) de l'IT0 ne portant pas le mot de VT (IT0 pairs), sont utilisés comme suit :

- bit n° 3 : transmet vers l'extrémité distante de la ligne à 2 048 kbit/s une indication de défaut affectant la réception locale (bit A). Ce bit doit être à 0 en l'absence d'alarme ; Les causes d'erreurs sont :
 - erreurs dans les codes
 - perte d'alignement de trame
- bit n° 4 : bit réservé à la transmission d'un canal d'exploitation, de maintenance et de supervision à faible débit (chacun des bits Sa peut porter un canal à 4 kbit/s) ou à des applications spécifiques ;
- bit n°s 5 à 8 : bits réservés à des applications nationales ou à des applications spécifiques à certains services, telles que transmission d'alarmes ou d'indications supplémentaires.

Les bits Sa non utilisés doivent être fixés à 1.

b) Structure et utilisation de l'IT16

L'IT16 est généralement réservé au transport de la signalisation des diverses voies du multiplex. Dans ce cadre, on peut distinguer deux modes principaux de transport de la signalisation :

- signalisation sémaphore (en anglais CCS : common channel signalling) ;
- signalisation voie par voie (en anglais CAS : channel associated signalling).

En mode signalisation sémaphore, l'IT16 transporte la signalisation en mode message, l'affectation à une voie particulière s'effectuant par adressage explicite contenu dans le message. Ce mode présente une grande souplesse et permet également le transport d'informations d'exploitation.

En mode signalisation voie par voie, l'IT16 porte une structure permettant une affectation implicite et donc stricte de la signalisation. Cette structure repose sur une multiframe d'IT16, composée de 16 trames. La multiframe d'IT16 est totalement indépendante de la multiframe de CRC4. La constitution de la multiframe est présentée en figure 12. Le premier IT16 de la multiframe (IT16 de la trame 0), porte le motif de verrouillage de multitrames : 0000 suivi de quatre bits dont trois bits de réserve plus le bit y servant à transmettre vers l'extrémité opposée de la liaison une information de défaut de fonctionnement local de la multiframe (par exemple, perte de verrouillage multiframe en réception). Les quinze IT16 qui suivent le mot de verrouillage de multitrames portent la signalisation de trente voies à 64 kbit/s à raison de quatre bits par voie (capacité de signalisation de 4×500 bit/s par voie).

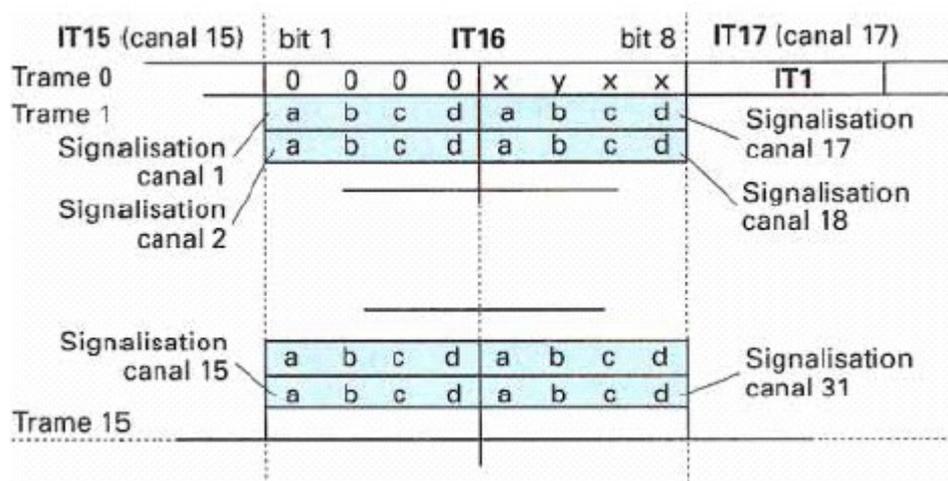


Figure n°14 : Structure de la multiframe d'IT16 (technique de l'ingénieur [1])

c) Signaux à l'interface physique

Le signal correspondant au flux de données à 2 048 kbit/s est transmis par une interface physique, définie par l'Avis G.703, § 6. Les signaux sont émis sous forme bipolaire selon le codage HDB3 (haute densité binaire) avec les conventions suivantes :

- à un « 1 » binaire correspond une impulsion de polarité positive ou négative, alternée par rapport à la précédente ;
- à un « 0 » binaire correspond en principe une absence de signal. En pratique, afin d'éviter, en réception, des défauts de récupération d'horloge bit dus à la transmission

de longues suites de données à zéro, des impulsions sont ajoutées en violant le principe d'alternance des polarités (viols de parité). Ces impulsions sont reconnues et retirées à la réception.

Multiplexage MIC-E2 ou TN2 à 8 Mbit/s [avis G744]

Dans ce type de multiplexage, on suppose la synchronisation de toutes les horloges des canaux affluents. Il n'y a donc aucun dispositif de régulation d'horloge (justification) à prévoir.

Les 4 affluents entrant fournissent au multiplexeur 32 IT à 2048 kbit/s.

La trame comporte 132 ITs de 8 bits soit 1056 bits en 125 µs. L'horloge de sortie est donc de 8448 kHz avec une variation relative de 30 ppm. Il s'agit d'un multiplexage octet par octet.

Le verrouillage de trame est de 14 bits : 11100110100000.

La trame ainsi construite est de la forme :

IT0 : 1^{er} octet : 11100110 Alignement

IT1 : 2^{ème} octet : IT 0 de l'affluent n°1 soit l'IT de verrouillage de l'affluent 1

IT2 : 3^{ème} octet : IT 0 de l'affluent n°2 soit l'IT de verrouillage de l'affluent 1

IT3 : 4^{ème} octet : IT 0 de l'affluent n°3 soit l'IT de verrouillage de l'affluent 1

IT4 : 5^{ème} octet : IT0 de l'affluent n°4 soit l'IT de verrouillage de l'affluent 1

IT5 à IT32 : 6^{ème} octet à l'octet 33 soit 28 octets : 7 ITs (IT1 à IT 7) de chaque affluents

IT33 : Spare Time Slot : IT remplissage

IT34 à 65 : 32 IT, 8 IT par affluents (IT8 à IT15)

IT 66 : Signal de verrouillage de trame, les 6 derniers bits restant 100000 + 2 bits de service

IT67 à 70 : Signalisation voie par voie (IT16 de chaque affluent)

IT71 à 98 : Réservés aux ITs des affluents soit 28 ITs donc 7 par affluent (IT17 à IT23)

IT 99 : Spare Time Slot : IT remplissage

IT 100 à 131 : 32 Its soit 8IT par Affluent (IT24 à IT31)

*NB : Dans le cas d'une signalisation par canal sémaphore, pour un canal dédié les ITs de services IT2, IT3, IT4, IT67 à IT70 sont aussi réservés à la téléphonie
IT0, IT1, IT33, IT66, IT99 sont des IT de services.*

Multiplexage de canaux numérique à 8 Mbit/s avec justification positive ou négative [avis G745]

a) Caractéristiques générales

La trame secondaire TN2 se compose de 4 affluents primaires (E1) et elle a un débit de 8,448 Mbit/s avec une variation relative de 30 ppm. La trame est composée de 1056 bits émis sur une durée de 125µs.

Cet avis permet de prendre en compte la justification positive et négative.

Le code pour la justification est défini par les valeurs suivantes et ne sont pris en compte que s'ils apparaissent identiques dans deux trames successives :

CODE 111 : Positive

CODE 000 : Négative

Dans le cas où il n'y a pas de justification, alternance 000/111 sur les deux trames consécutives.

b) Structure

Nombre d'affluents		4 x 2048 kb/s
La structure est divisée en 4 groupes identifiés I à IV	Nombre de bits	Identification des bits et nombre de bits par groupe
GROUPE I		264
Signal Verrouillage de trame	8	1 à 8
Réservé aux affluents	256	9 à 264
GROUPE II		264
Bits de commande de Justification Cj1	4	1 à 4
Bits pour service		5 à 8
Réservé aux affluents	256	9 à 264
GROUPE III		264
Bits de commande de Justification Cj2	4	1 à 4
Bits de secours		5 à 8
Réservé aux affluents	256	9 à 264
GROUPE IV		264
Bits de commande de Justification Cj3	4	1 à 4
Bits des affluents disponibles pour justifications négatives	4	5 à 8
Bits des affluents disponibles pour justifications positives	4	9 à 12
Réservés aux affluents		13 à 264



Multiplexage de canaux numérique à 8 Mbit/s avec justification positive [avis G742]

ATTENTION, cette partie ne traite que de la recommandation G742 avec une justification positive.

a) Caractéristiques générales

La trame secondaire TN2 se compose de 4 affluents primaires (E1) et elle a un débit de 8,448 Mbit/s avec une variation relative de 30 ppm. La trame est composée de 848 bits, ce qui correspond à une durée de 100,4µs. On remarque donc que la durée d'une trame secondaire est plus courte que celle d'une trame primaire (100,4µs contre 125µs).

De plus, cet avis ne permet de prendre en compte que la justification positive, ce qui signifie que la vitesse de sortie pourra occasionnellement être plus élevée à la somme des vitesses d'entrées mais jamais inférieure.

b) Structure

La trame secondaire TN2 est formée de quatre groupes de même longueur (212 bits). Le signal de verrouillage est formé de 10 éléments binaires groupés à chaque trame du début du premier secteur.

Groupe 1		Groupe 2		Groupe 3		Groupe 4	
12	200	4	208	4	208	4	208

Le groupe 1 possède :

- 1 mot de 12 bits, dont 10 bits de verrouillage de trame qui indique le début de la trame multiplex E2 (fanion ou drapeau valant 1111010000) suivis de 2 bits pour les alarmes. Les éléments binaires 11 et 12 du premier secteur constituent des éléments binaires de service. L'élément binaire 11 est utilisé pour transmettre une indication d'alarme émise vers l'équipement de multiplexage numérique éloigné en cas de dérangement de l'équipement de multiplexage numérique local (perte de verrouillage par exemple). L'élément binaire 12 réservé à l'usage national peut être utilisé pour transmettre la parité de la trame précédente. Sur le conduit numérique traversant une frontière, la valeur de ce bit est fixée à « 1 ».
- 200 bits répartis en $50 \times 4 = 200$ bits d'information pour les 4 affluents. Les 200 bits contiennent les 50 premiers bits de chaque affluent, **entrelacés c'est à dire multiplexé bit à bit et non mot à mot.**

Les groupes 2 et 3 possèdent :

- 4 bits d'indication de justification.
- $52 \times 4 = 208$ bits d'information pour les 4 affluents

Le groupe 4 possède

- 4 bits d'indication de justification.
- une justification éventuelle s'effectue dans le secteur 4 à l'emplacement du premier élément binaire de l'affluent considéré (bit 5 à 8).
- $52 \times 4 = 208$ bits d'information pour les 4 affluents dont un [position 155 pour 1 affluent, noté JB] peut être un bit justification

A ce stade, on peut se poser la question du nombre de bits de contrôle de Justification par rapport à 4 bits de Justification. En effet, dans le groupe 2, 3 et 4 on trouve 4 bits de contrôle de Justifications, soit un total de 12 bits de contrôle de justification. En fait, l'information est triplé de manière à garantir ou non une justification. Soit, On note $C_{j,i}$ ou j représente le groupe et i le position du bit (qui correspond à l'affluent). Quand il n'y a pas d'erreur $C_{j,i}$ est identique pour tout j .

Si $C_{1,1}=C_{2,1}=C_{3,1}=1$ alors il y a un bit de justification pour l'affluent n°1

Il y a donc 206 (ou 205 pour le groupe 4) bits d'information par affluent dans chaque trame. Le multiplexage est réalisé par **entrelacement bit à bit** dans l'ordre de numérotation des affluents. On trouvera la structure de la trame dans le tableau 2.

On peut remarquer en prime abord que la trame MIC-E2 transmet 848 bits dont 24 bits de signalisation. Il y a ainsi 824 bits utiles par trame. Or, la trame MIC-E1 est composée de 240 bits utiles (30 voies multiplexées de 8 bits) et 16 bits de signalisation. Ainsi, par multiplexage de 4 trames MIC-E1, on devrait obtenir une trame MIC-E2 de 1024 bits.

Il faut se rappeler que le multiplexage plésiochrone est dit transparent, c'est à dire sans regard des bits qui doivent être transmis. Chaque trame TN2 émet 206 bits utiles par affluent (824/4) sur une durée de 100,4µs. Chaque affluent est défini par une trame de 256 bits dont 8 bits IT0 propre à la trame MIC-E1 sur une durée de 125 µs, ce qui correspond environ à 200 bits utiles de la trame MIC-E1 en 100,4 µs. Il n'y a donc aucune perte de données.

c) Synchronisation- Justification

Les groupes de 4 bits de justification permettent de synchroniser les 4 affluents (se reporter au paragraphe 2) : chaque affluent possède une horloge qui n'est pas rigoureusement identique à celle des 3 autres, ni égale au $\frac{1}{4}$ du flux résultant MIC-E2.

d) Propriétés

1. Le multiplex à 8 Mbit/s ignore la structure des multiplexeur à 2 Mbit/s (i.e. transparence). Note : pour "commuter" des systèmes 2 Mbit/s, dans des équipements appelés brasseurs (DXC = "Digital Cross Connect"), il faut tout démultiplexer (on verra que cet inconvénient est résolu en SDH).

2. Le débit maximum disponible par affluent dans le multiplex = $8,448 \text{ Mbit/s} / 4 = 2,112 \text{ Mbit/s}$. Pour un débit nominal d'affluent à 2,048 Mbit/s, le nombre de bits significatifs parmi les 212 (848/4) de chaque affluent est donc égal à $212 \times 2,048 = 205 + 19/33$, et par conséquent : 2,112 en moyenne 14 trames sur 33 contiennent donc 1 bit de justification (et donc $0,424 =$ taux nominal de justification).

3. Le débit maximum de justification est de 1 bit tous les 212 bits par affluent, soit 0,47 % en relatif ; il permet donc de compenser une différence relative maximale de 0,47 % entre le débit de l'affluent entrant et le débit disponible pour l'affluent sortant dans le multiplex.

Les ordres supérieurs des multiplex sont structurés de manières similaires.

Multiplexage MIC-E3 ou TN3 à 34 Mbit/s [avis G751]

a) Caractéristiques générales

La trame tertiaire se compose de 4 affluents E2 et elle a un débit de 34,368 Mbit/s avec une variation relative de 20 ppm. La trame est composée de 1536 bits, ce qui correspond à une durée de 44,69 µs.

b) Trame

Elle est formée de quatre secteurs (groupes) de même longueur. Le signal de verrouillage est formé de 10 éléments binaires groupés à chaque trame du début du premier secteur. Sa configuration est de 1111010000. Les éléments binaires 11 et 12 du premier secteur constituent des éléments binaires de service. L'élément binaire 11 est utilisé pour transmettre une indication d'alarme émise vers l'équipement de multiplexage numérique éloigné en cas de dérangement de l'équipement de multiplexage numérique local (perte de verrouillage par exemple). L'élément binaire 12 réservé à l'usage national peut être utilisé pour transmettre la parité de la trame précédente. Sur le conduit numérique traversant une frontière, la valeur de ce bit est fixée à « 1 ».

Les indications de justification sont formées de 3 éléments binaires par affluent, répartis au début des secteurs 2, 3 et 4 et placés dans l'ordre de numérotation des affluents. Dans une trame, une justification éventuelle s'effectue dans le secteur 4 à l'emplacement du premier élément binaire de l'affluent considéré. Le multiplexage est réalisé par entrelacement bit à bit dans l'ordre de numérotation des affluents.

On trouvera la structure de la trame sur la figure 14.

c) Synchronisation – Justification

La synchronisation en fréquence nécessaire au multiplexage bit à bit des différents affluents se fait par accroissement du débit propre F_e de la même manière que celle effectuée pour le multiplexage MIC-E2. Cet accroissement des débits est obtenu par l'introduction d'éléments binaires supplémentaires pour chaque affluent dans le train binaire à 34 Mbit/s.

d) Insertion systématique

Pour permettre au démultiplexage l'identification dans le signal numérique résultant à 34 Mbit/s des éléments binaires relatifs à chaque affluent et l'élimination de leurs éléments de réserve, il est introduit dans chaque signal résultant à 34 Mbit/s des éléments binaires dits d'insertion systématique qui constituent le signal de verrouillage de trame et les indications de justification.

e) Exemple :

Quelques valeurs remarquables :

- longueur de trame : 1 536 bits ;
- nombre de bits par affluent : 378 bits ;
- débit maximal de justification par affluent : 22,375 kbit/s ;
- taux nominal de justification : 0,436.

Structure de trame	Plan de numérotage des bits
Signal de verrouillage de trame (1111010000)	<i>Groupe 1</i> 1 à 10
Indication d'alarme émise à l'équipement éloigné	11
Bit réservé pour usage national	12
Bits provenant des affluents	13 à 384
Bits C_{j1} d'indication de justification	<i>Groupe 2</i> 1 à 4
Bits provenant des affluents	5 à 384
Bits C_{j2} d'indication de justification	<i>Groupe 3</i> 1 à 4
Bits provenant des affluents	5 à 384
Bits C_{j3} d'indication de justification	<i>Groupe 4</i> 1 à 4
Bits de justification provenant des affluents	5 à 8
Bits provenant des affluents	9 à 384
C_{ji} désigne le i ème bit d'indicatif de justification du j ème affluent.	

Figure n°15 : Structure de la trame de multiplexage à 34.368 kbit/s (Technique de l'ingénieur [1])

Multiplexage MIC-E4 ou TN4 à 139.264 Mbit/s [avis G751]

a) Caractéristiques générales

La trame TN4 se compose de 4 affluents E3 et elle a un débit de 139,264 Mbit/s avec une variation relative de 15 ppm. La trame est composée de 2928 bits, ce qui correspond à une durée de 21.02 μ s.

b) Trame

Elle est formée de six groupes de même longueur. Le signal de verrouillage est formé de 12 éléments binaires groupés à chaque trame du début du premier secteur. Sa configuration est de 111110100000. Les éléments binaires 13, 14, 15 et 16 du premier secteur constituent des éléments binaires de service. L'élément binaire 13 est utilisé pour transmettre une indication d'alarme émise vers l'équipement de multiplexage numérique éloigné en cas de dérangement de l'équipement de multiplexage numérique local (perte de verrouillage par exemple). L'élément binaire 14 réservé à l'usage national peut être utilisé pour transmettre la parité de la trame précédente. Sur le conduit numérique traversant une frontière, la valeur de ce bit est fixée à « 1 ». Les éléments binaires 14, 15 et 16 sont disponibles en tant qu'éléments binaires de réserve.

Les indications de justification sont formées de 5 éléments binaires par affluent, répartis au début des secteurs 2, 3, 4, 5 et 6 et placés dans l'ordre de numérotation des affluents. La présence de justification est indiquée par le signal 11111, son absence par le signal 00000. Dans une trame, une justification éventuelle s'effectue dans le secteur 6 à l'emplacement du premier élément binaire de l'affluent considéré.

Le multiplexage est réalisé par entrelacement bit à bit dans l'ordre de numérotation des affluents.

La structure de la trame est représentée sur la figure 15.

c) Synchronisation - Justification

La synchronisation en fréquence nécessaire au multiplexage bit à bit des différents affluents se fait par accroissement du débit propre F_e de la même manière que celle effectuée pour le multiplexage MIC-E3. Cet accroissement des débits est obtenu par l'introduction d'éléments binaires supplémentaires pour chaque affluent dans le train binaire à 140 Mbit/s. Cette opération est appelée justification positive. La fréquence nominale des justifications pour un affluent de débit propre est donc de ϵF_e

d) Insertion systématique

Pour permettre au démultiplexage l'identification dans le signal numérique résultant à 140 Mbit/s des éléments binaires relatifs à chaque affluent et l'élimination de leurs éléments de réserve, il est introduit dans chaque signal résultant à 140 Mbit/s des éléments binaires dits d'insertion systématique qui constituent le signal de verrouillage de trame et les indications de justification.

Structure de trame	Plan de numérotage des bits
	<i>Groupe 1</i>
Signal de verrouillage de trame (111110100000)	1 à 12
Indication d'alarme émise à l'équipement éloigné	13
Bit réservé pour usage national	14 à 16
Bits provenant des affluents	17 à 488
	<i>Groupe 2 à 5</i>
Bits C_{ji} d'indication de justification	1 à 4
Bits provenant des affluents	5 à 488
	<i>Groupe 6</i>
Bits C_{j5} d'indication de justification	1 à 4
Bits de justification provenant des affluents	5 à 8
Bits provenant des affluents	9 à 488
C_{ji} désigne le i ème bit d'indicatif de justification du j ème affluent.	

Figure n°16 : Structure de la trame de multiplexage à 139.264 kbit/s (Technique de l'ingénieur [1])

e) Exemple :

Quelques valeurs remarquables :

- longueur de trame : 2 928 bits ;
- nombre de bits par affluent : 723 bits ;
- débit maximal de justification par affluent : 47,560 kbit/s ;
- taux nominal de justification : 0,419.

C.Conclusion

La norme PDH est une norme internationale de l'ETSI basée sur des affluents à 2 Mbps et définie par l'UIT. Elle couvre les débits de transmission hiérarchiques de 2 Mbps, 8 Mbps, 34 Mbps et 140 Mbps. La norme DS_n représente la norme ANSI couvrant les débits de transmissions de 1,544 Mbps (DS1), 6,312 Mbps (DS2) et 44,736 Mbps (DS3). Le trafic PDH est asynchrone à 8 Mbps, 34 Mbps et 140 Mbps. Pour accéder à un signal, qu'il s'agisse de le réacheminer ou de le tester, il faut nécessairement démultiplexer toute la structure de signalisation de la ligne, niveau par niveau, jusqu'aux affluents à 2 Mbps, étant donné l'entrelacement bit à bit de chaque affluent. A chaque étape du multiplexage, les débits binaires des signaux des différents affluents doivent être contrôlés et ajustés dans des limites spécifiées, mais ils ne sont pas synchronisés avec l'équipement de multiplexage. Ces débits binaires d'affluents individuels étant ajustés entre des limites spécifiées, ce type de multiplexage est appelé plésiochrone, ce qui signifie "presque synchrone". Les affluents sont synchronisés individuellement avec l'équipement à chaque étape du multiplexage par un processus de justification positive par des bits de remplissage. Ainsi, il y a autant d'horloges différentes qu'il y a d'éléments sur le réseau. Or, pour une transmission de bonne qualité, il est nécessaire de synchroniser chaque émetteur avec chaque récepteur. Pour pallier à ce problème, ainsi que celui lié au principe de multiplexage plésiochrone, à savoir :

- au niveau de la flexibilité des débits que l'on peut offrir aux abonnés (besoins de 1,5 et 45 Mbit/s pour les abonnés professionnels) ;
- par le besoin d'améliorer le contrôle de la qualité et par la nécessité d'évoluer vers des débits plus élevés sur des supports optiques

une nouvelle hiérarchie de système de transmission a vu le jour : La Hiérarchie Numérique Synchrone ou SDH en Europe et SONET (Synchronous Optical NETWORK) aux USA.

Iç. La hiérarchie SDH/SONET (rec. G.707)

A. Introduction

Dans les systèmes PDH, le principe est la transparence, c'est à dire que les interfaces et les multiplex normalisés à 8, 34 et 140 Mbit/s n'imposent pas de contraintes sur le contenu binaire. Mais, de par le procédé d'insertion de bits de justification, de bourrage de trame et d'entrelacement par bit, il est nécessaire de procéder à toutes les opérations de démultiplexage 140/34, 34/8 et 8/2, pour extraire une trame à 2 Mbit/s dans un multiplex à 140 Mbit/s. Cela signifie que l'on doit, à chaque étape, récupérer l'horloge, la trame et retrouver les bits de justifications pour n'extraire que l'information utile.

Un deuxième inconvénient est l'absence de normalisation au niveau du C.C.I.T.T., ce qui veut dire qu'on ne peut pas interconnecter deux hiérarchies (U.S.A., EUROPE, JAPON) sans passer par un équipement intermédiaire, car par exemple aux U.S.A. les débits utilisés sont le 275Mbit/s, le 44Mbit/s, le 6Mbit/s, le 1,5Mbit/s et le 64kbit/s ; alors qu'en Europe on utilise le 560, le 140, le 34, le 8 et le 2 Mbit/s, le 64kbit/s.

En 1998 est apparue la hiérarchie synchrone. Elle se distingue essentiellement de la hiérarchie plésiochrone par la présence d'horloge à tous les niveaux du réseau réduisant les écarts d'horloges. Cette hiérarchie repose sur une trame numérique de niveau élevé qui apporte une facilité de brassage et d'insertion/extraction des niveaux inférieurs.

Le multiplexeur est disposé dans les liaisons de réseaux pour effectuer des tâches d'extractions et d'insertions sur les flux multiplexés. Il comporte un élément de démultiplexage et de multiplexage (ADM : Add Drop Multiplex ou Multiplexeur à insertion/extraction).

Les brasseurs avec insertion-extraction transmettent certains canaux une entrée/sortie particulière et insèrent d'autres canaux à leur place. Les flux insérés sont égaux aux flux sortants.

Les concepts de la SDH permettent ainsi de remédier aux inconvénients de la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH). Les signaux sont encapsulés dans un « container » et à chaque container est associé un surdébit destiné à l'exploitation de celui-ci. Le container et le surdébit constituent un container virtuel (VC). Un pointeur (surdébit) pointe sur la charge utile de la trame. Lorsque l'horloge source n'est pas en phase avec l'horloge locale, la valeur du pointeur est incrémentée ou décrémentée. L'utilisation de ces pointeurs permet d'insérer ou d'extraire un train numérique de différents débits sans être contraint de reconstituer toute la hiérarchie des multiplexeurs, comme c'est le cas pour le PDH.

Le SDH peut transmettre des données multiples de 1.536 Mb/s et 2.048 Mb/s, c'est à dire les débits PDH dont elle assure le relais. Les débits de base de la **hiérarchie synchrone** sont 155,520 Mbit/s, 4 fois 155,520 (environ 620 Mbit/s) et 16 fois 155,520 (environ 2,5 Gbit/s). Parfois, les données sont transportées dans un débit de base plus faible, 51.84 MB/s qui est constitué par une suite de trames appelées STM-0 et qui correspond au STS-1 en standard Américain SONET. Le passage de la trame de base à un débit supérieur s'effectue simplement par **entrelacement d'octet** et non bit à bit comme c'est le cas pour la hiérarchisation PDH. Il apparaît aujourd'hui sur le marché les premiers systèmes à 64 x 155,520 Mbit/s soit environ 10 Gbit/s. Ces informations ne transitent non plus sur des câbles mais sur des fibres optiques.

Niveau SDH	Débit en kbit/s	Niveau SONET	Débit en kbit/s	Supports
------------	-----------------	--------------	-----------------	----------

STM - 1	155.520	STS - 1	51.840	FO, Coax, radio
STM - 4	622.080	STS - 3	155.520	FO
STM - 16	2.488.320	STS - 12	622.080	FO
STM - 64	9.953.280	STS - 48	2.488.320	FO

Tableau récapitulatif des débits des normes SDH et SONET

Le principe de multiplexage dans la trame de base à 155 Mbit/s prend en compte de nombreux types d'affluents, dont les débits plésiochrones cités précédemment. Un des avantages est la visibilité directe des affluents dans la trame de base ce qui simplifie les opérations d'insertion et d'extraction au niveau des divers équipements, et elle permet en outre de transmettre dans un multiplex synchrone des débits divers (ex ATM, TVHD). Le système synchrone est capable de fonctionner en plésiochrone car il possède des mécanismes internes de justification, néanmoins une interconnexion facile avec l'existant, demande la synchronisation des différents éléments de réseau sur une référence d'horloge commune principalement à des fins de simplification du filtrage des sauts de phase.

Dans les nouveaux réseaux SDH / SONET, les signaux PDH / DS_n sont "mappés" (mis en correspondance) dans des conteneurs ou affluents dits virtuels, avant d'être transportés dans le cadre de la capacité utile SDH / SONET. La capacité utile SDH / SONET doit ensuite être "démappée" en signaux d'affluents PDH / DS_n.

De plus, les multiplexeurs de la hiérarchie plésiochrone actuelle disposent de quelques éléments binaires de réserve qui peuvent être utilisés pour effectuer des contrôles de qualité entre deux équipements de multiplexage d'un même niveau. Cependant le débit disponible reste faible et limite les possibilités d'exploitation et de maintenance. D'autre part, il n'est pas utilisable par les systèmes de ligne. Le fait que la SDH soit essentiellement orientée vers la transmission sur fibres optiques a permis de diminuer les contraintes de débit. Une part relativement importante du débit peut donc être réservée aux différentes fonctions d'exploitation maintenance, elles existent aux différents niveaux définis dans la SDH.

Ainsi, la SDH introduit de nouvelles possibilités dans les réseaux de transmission :

- souplesse accrue par la possibilité d'extraire ou d'insérer directement un signal constituant du multiplex de ligne ;
- facilités d'exploitation-maintenance : des débits importants sont réservés à ces fonctions ;
- possibilité d'évolution vers des hauts débits : les trames synchrones haut débits sont construites par multiplexage synchrone de l'entité de base. Cette entité de base définit implicitement toutes les trames
- haut débit, la limitation n'est plus que technologique ;
- interconnexion de systèmes à haut débit facilitée par la normalisation de la trame de ligne et des interfaces optiques correspondantes ;
- architectures de réseaux assurant la sécurisation contre les défauts de ligne ou d'équipement
- la modularité des équipements SDH est plus adaptée aux progrès de la technologie que les équipements plésiochrones.

Dans cette présentation générale de la SDH, nous allons aborder les principes de base de la SDH, l'architecture des réseaux qui en découle et les principes mis en oeuvre pour la gestion des réseaux SDH.

B.

La trame SDH

Le transport de données s'effectue par blocs de données appelées Trames ; chaque bloc comporte deux principales zones de données : La zone des informations ou données de services, et les données transportées désignées par charge utile.

La trame de base, appelée STM-1 'Synchronous Transfert Module 1' est structurée en octet et est divisée en trois zones dévolues aux informations suivantes :

- Capacité Utile ('Payload') qui est l'information utile, c'est-à-dire celle de l'utilisateur.
- Les pointeurs
- Le surdébit de section (SOH='Section OverHead') qui est réservée à l'exploitation et à la maintenance. En effet, l'exploitation et la maintenance nécessitent l'utilisation de données de services, bits ou octets supplémentaires qui accompagnent les données. Elles entraînent une augmentation de débit.

Le signal utile, c'est-à-dire l'affluent est projeté dans une enveloppe adaptée au débit du signal et à la structure de la trame, appelé Conteneur.

Le Conteneur (Cn)

Le conteneur Cn est une entité sous forme de blocs d'octets dont la capacité est dimensionnée pour assurer le transport d'un des différents débits affluents à la SDH définis par le CCITT. Le conteneur joue le rôle de régénération du signal plésiochrone de départ, il récupère l'horloge et transforme le code de transfert selon les débits entrants. Le " n " de **Cn dépend du débit entrant**, par exemple :

Dénomination	Débit entrant (Mbits/s)
C11	1.544
C12	2.048
C3	34.368 ou 44.736
C4	139.264

Récapitulatif des différents débits versus le conteneur

C4 : Après récupération des données provenant d'un signal à 140 Mbit/s (ATM ou TN4 de la PDH) le C4 est élaboré en positionnant ces données dans un paquet de 180 blocs (9 x 20) chacun constitué de 13 octets. (9 x 20 X 13 x 8 bits = 18720 bits en 125 µs soit 149, 760 Mbit/s > 139264 Kbit/s ce qui laisse des bits libres pour une éventuelle justification).

C3 : Il est élaboré à partir d'affluents à 34Mbit/s provenant du multiplex tertiaire TN3 de la PDH. Les données récupérées sont placées dans un conteneur de 756 octets (9 x 84 octets) soit un total de (9 x 84 x 8bits en 125 µs = 6048 bits en 125 µs = 48, 384 Mbit/s)

C12 : La figure ci dessous illustre l'organisation du C12 pour un affluent à 2 Mbit/S :

Le conteneur contient donc un paquet de données utiles (payload) arrivés au rythme du débit de l'affluent, plus un certain nombre d'octets de bourrage dont le rôle est d'adapter le débit incident à la structure de la trame.

Ce conteneur est transporté dans le réseau de transmission SDH, le chemin dans le réseau entre le point d'entrée et le point de sortie, constitue ce qu'on appelle un conduit ('path'). Une des propriétés essentielles de la SDH est de pouvoir gérer ce conteneur (indépendamment de son contenu) et son conduit à travers le réseau. A cette fin, des bits de gestions appelés POH (surdébit de conduit) sont ajoutés au conteneur. L'ensemble constitue ce qu'on appelle un conteneur virtuel.

Le conteneur virtuel : VCn (Virtual Contener):

Le conteneur virtuel VCn est alors obtenu à partir du conteneur en lui ajoutant un entête (PATH OVER HEAD = POH) utilisé pour la gestion du conteneur (routage, concaténation, justification...).

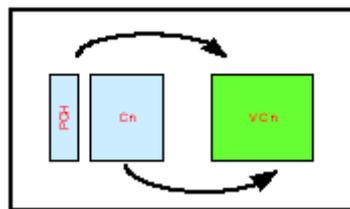


Figure n°17 : Conteneur virtuel

Les VCn sont des éléments de bases transportés par le réseau SDH, ils seront multiplexés pour obtenir des blocs plus grands et ainsi de proche en proche jusqu'à l'obtention d'une trame de base STM-1 constitué de 2430 octets.

Le conteneur virtuel VC est une entité gérée par le réseau SDH.



Le VC est l'entité gérée par le réseau SDH

Figure n°18 : Conteneur et conteneur virtuel

Il existe deux niveau de VC : Le Low-Order VC (LO-VC) et le High Order VC (HO-VC).

Les LO-VC correspondent aux affluents de base 1.5Mbits/s (DS1) et 2 Mbit/s (E1) (soit VC-11 et VC-12) et aux affluents PDH : 6Mbit/s et 34 Mbit/s ou 45 Mbit/s (respectivement VC-2 et VC-3).

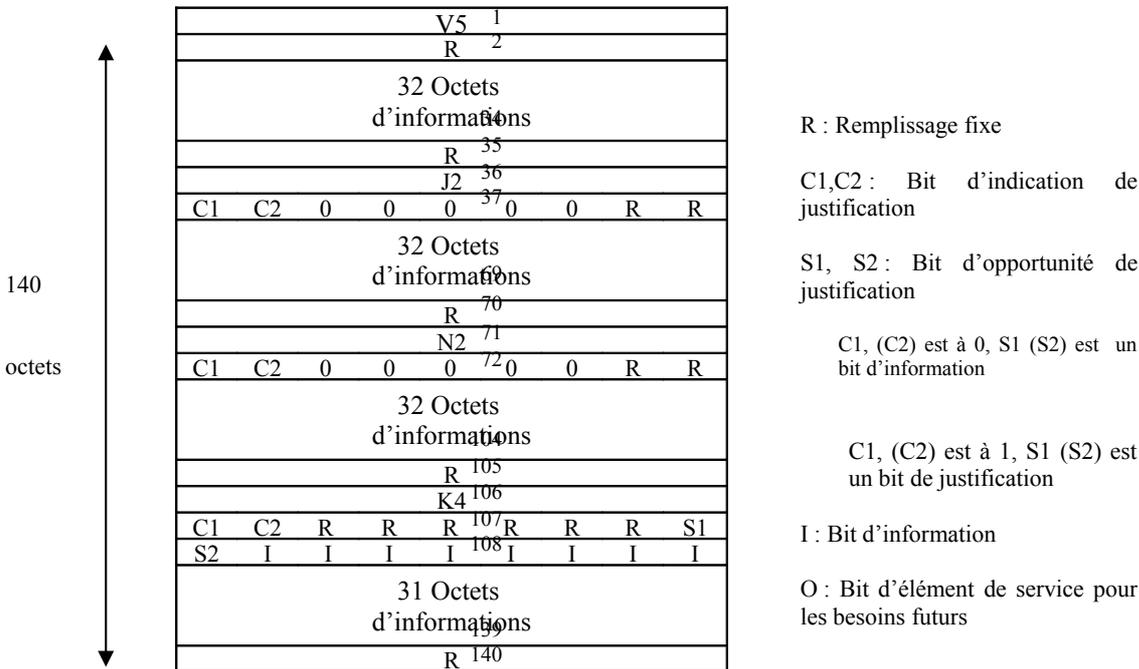


Figure n°19 : C12 : Périodicité de 500 µs (cf insertion MIC E1)

L'unité d'affluent : TUn (Tributary Unit)

Pour pouvoir remplir un VC avec un affluent et le projeter dans la trame SDH, tout en pouvant le localiser immédiatement, la SDH utilise un pointeur, c'est-à-dire une adresse. L'idée est de ne pas placer le conteneur à un endroit précis dans la trame, ce qui nécessiterait des mémoires-tampons pour synchroniser, mais d'indiquer dans une zone mémoire (pointeur), l'adresse relative du conteneur par rapport au début de la trame. Pratiquement, le VC flotte donc à l'intérieur des trames et est le plus souvent en chevauchement sur deux trames consécutives. Ce pointeur est nécessaire car les Tus sont construites à l'aide d'horloge SDH qui est indépendante de celles des affluents, le début d'une TU ne coïncide pas forcément avec celui d'un VC. La valeur de ce pointeur indique l'emplacement du VCn dans la trame de transport. Ce pointeur est associé au processus de justification du VC dans la trame de transport, c'est à dire que la position du VC dans la trame peut changer si il y a justification.

Le pointeur a donc deux fonctions importantes : Rattraper le déphasage des trames synchrones (justification) et assurer la synchronisation des trames asynchrones.

a) Justification

Bien que le réseau soit synchronisé (cf. Figure 1), il existe toujours un problème d'asynchronisme comme en PDH, dû au fait que les horloges locales ne sont jamais exactement synchrones et que la gigue et le dérapage affectent le transport d'une trame synchrone d'un noeud vers un autre à travers le réseau. Pour résoudre ce problème, on utilise le mécanisme des pointeurs mais aussi des octets de justifications.

La justification est l'opération permettant d'adapter un signal de débit variable dans une trame de débit fixe. Chaque niveau (plésiochrone ou synchrone) étant défini avec une plage $\pm\Delta x$. pour pouvoir garantir le transport de Entree = $X \pm\Delta x$ dans la trame, il faut lui allouer le plus grand débit possible, $S1 = X + \Delta x$. Ce débit $S1$ est constitué comme suit :

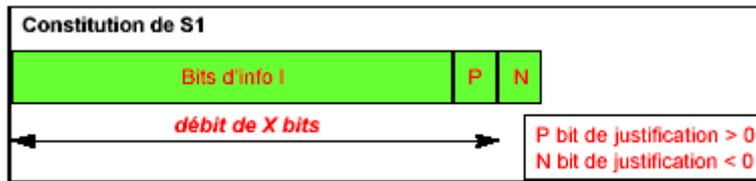


Figure n°20 : Taille de la trame pour une justification positive ou négative

Le pointeur permet alors de gérer dans un réseau SDH les asynchronismes dus aux horloges différentes servant à constituer, router ou extraire des VC. A titre d'exemple, en cas de décalage entre l'horloge du STM-1 et celle du VC4 transporté, la valeur du pointeur sera augmentée ou diminuée selon les besoins. Si par exemple le débit du VC-4 est supérieur à celui de la trame STM-1, des octets supplémentaires seront ajoutés à cette dernière, opération de justification négative, puisque l'on ajoute des octets pour transmettre de l'information. Elle se conclut dans la trame suivante par un ajustement de la valeur du pointeur. Les VC4 se trouvent ainsi décalés dans la trame STM-n. Cela dit, le pointeur d'AU-4 est composé de 9 octets dont les trois derniers (H3) donnent l'indication de justification négative. Il a la configuration suivante :

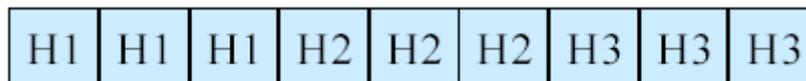


Figure n°21 : Synchronisation

Le mécanisme de justification permet en principe de faire fonctionner la SDH dans un environnement plésiochrone. Cependant le réajustement des pointeurs se fait par saut d'octet, alors qu'en PDH, la justification se fait par bit. Un des affluents majeurs de la SDH étant le E1, souvent extrait d'un multiplex PDH, il est nécessaire que la SDH puisse transporter de bout en bout un conduit de 2Mbit/s en respectant les contraintes de la gigue du réseau qui sont plus sévères : c'est dès lors le support du réseau PDH qui demande la synchronisation du réseau SDH. Le réajustement des pointeurs se traduit par une gigue de pointeur qu'il faut garder dans les limites acceptables.

On appelle unité d'affluent, TU-n, le module composé du VCn et d'un pointeur PTR associé.

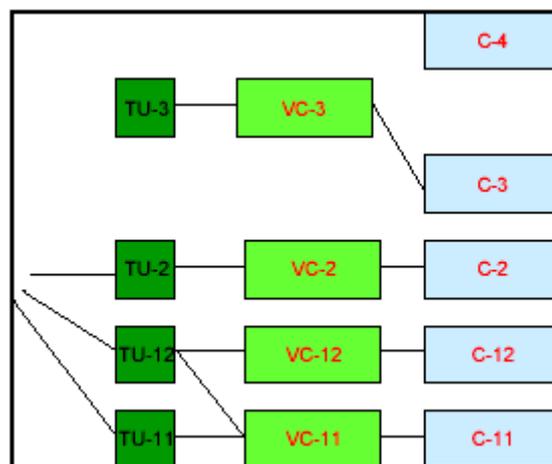


Figure n°22 : L'unité d'affluent

Le groupe d'unité d'affluent : TUGn (Tributary Unit Group)

Un groupe d'unité d'affluent (TUG) représente une structure virtuelle de la trame réalisant le multiplexage de TUn. Le TUG est un multiplex temporel d'unités d'affluents TU 1, 2 ou 3 multiplexés entre eux. Cela permet de regrouper des TUs pour les assembler en une entité (bloc) de dimension supérieure. Le multiplexage se fait toujours octet par octet. Le TUG peut être considéré comme les règles de rangement des TU dans la trame de transport.

Par exemple :

- Le TUG 2 regroupe soit 3 TU12, soit 1 TU2.
- Le TUG 3 assemble 7 TUG 2 soit 1 TU3

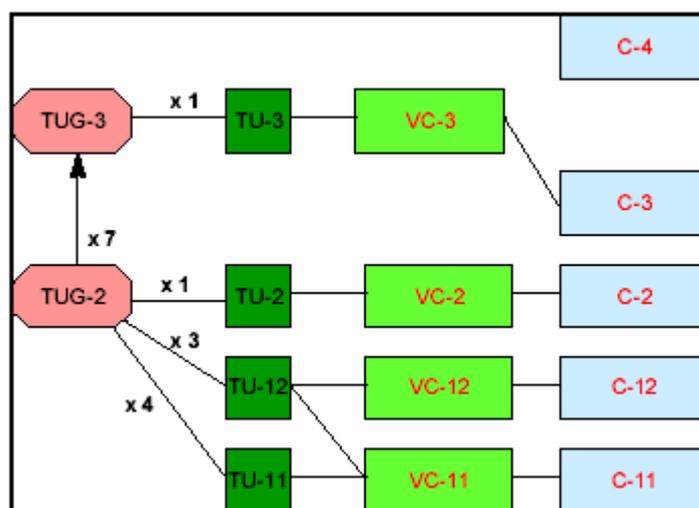


Figure n°23 : Groupe d'unité d'affluent

L'unité administrative AU (Administrative unit) pour le haut débit:

L'unité d'administration AU se compose d'un conteneur virtuel d'ordre supérieur associé à un pointeur d'AU. La valeur de ce pointeur indique l'emplacement du début du container dans la trame STM-n utilisée. Ainsi, l'unité administrative AU4 est composée du VC4 et du pointeur PTR associé. La valeur du pointeur indique le début du VC4 dans la trame de transport utilisée. Ce pointeur est associé au processus de justification du VC4.

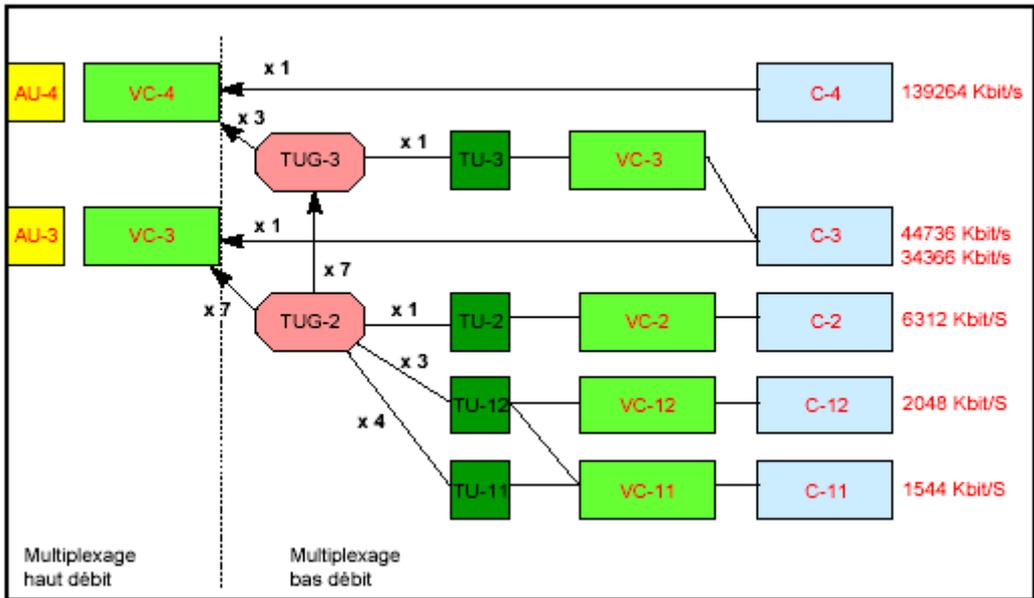


Figure n°24 : Unité administrative

🕒👉 Le groupe d'unité Administrative : AUG (Administrative unit Group) :

Le groupe d'unité administrative n'est pas une nouvelle entité physique mais représente une structure virtuelle de la trame. L'AUG correspond à la place que doit occuper l'AU4 dans la trame de transport ou à la place de 3 unités d'ordre 3 multiplexées.

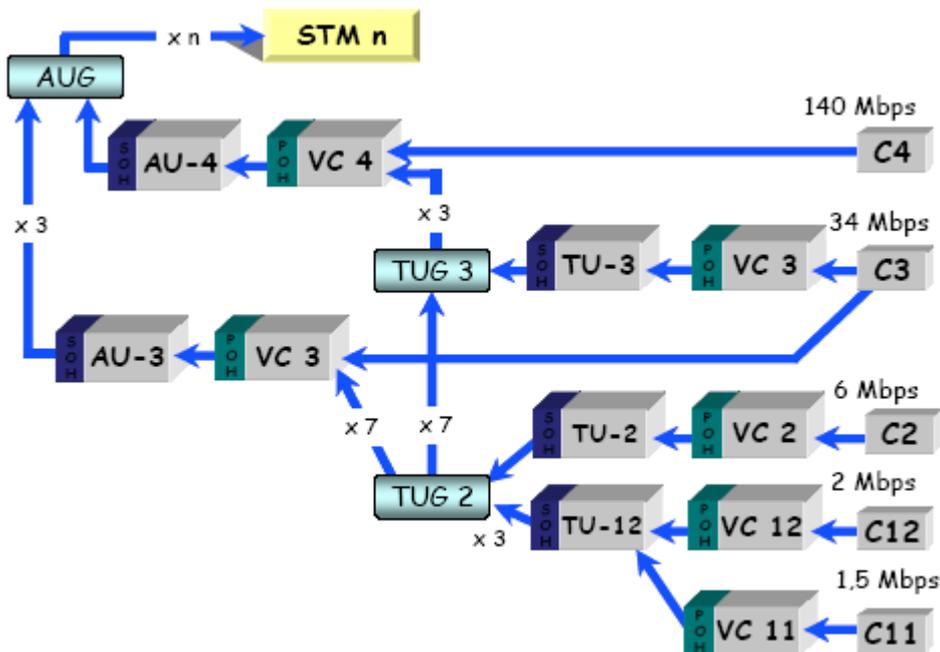


Figure n°25 : Structure de la SDH

C. Les trames de transport STM-n (Synchronous Transport Module) du SDH

Les trames de transport STM-n sont obtenues en multiplexant n AUG. De la même manière qu'un sur-débit POH est utilisé pour la gestion des conduits, on ajoute à la trame de transport STM-n un sur-débit de section SOH (Section Overhead).

Le multiplexage SDH

Le multiplexage s'effectue en deux étapes. Au cours de la première étape, les LO-VC sont multiplexés dans les HO-VC. Puis, les HO-VC sont multiplexés dans les STM. On passe ainsi des conduits LOP (Low Order Path) aux conduits HOP (High Order Path), puis des conduits HOP à la section. La section est associée au transport des modules STM. Une section est partagée entre section de régénération (RSOH) et de multiplexage (MSOH).

La structure de base : STM1

Pour la STM-1, La trame comporte 270 colonnes de 9 octets, expédiées toutes les 125 μ s, soit 8000 par seconde ou un débit de 155,520 Mbit/s. 9 colonnes d'octets sont réservées à la gestion de la section de multiplexage qui a donc une "charge utile" (payload) de 2349 octets (9 lignes et 261 colonnes).

L'originalité de la technique SDH est l'utilisation de "pointeurs" et de la "justification" positive, négative ou nulle, permettant de préserver l'intégralité et la visibilité des affluents. Le pointeur repère à chaque instant l'adresse de l'information utile dans la trame STM-n.

La trame de base est donc caractérisée par :

- sa longueur 2430 octets,
- sa durée 125 μ s, son débit 155,520 Mbit/s,
- sa capacité utile 2349 octets.

Elle se décompose en trois zones représentées ci-dessous :

- surdébit de section, divisé en surdébit pour la section de régénération ou RSOH et surdébit de section de multiplexage ou MSOH,
- les pointeurs d'AU,
- les charges utiles VC 4, une pour STM 1, 4 pour STM 4 ou 16 pour STM16.

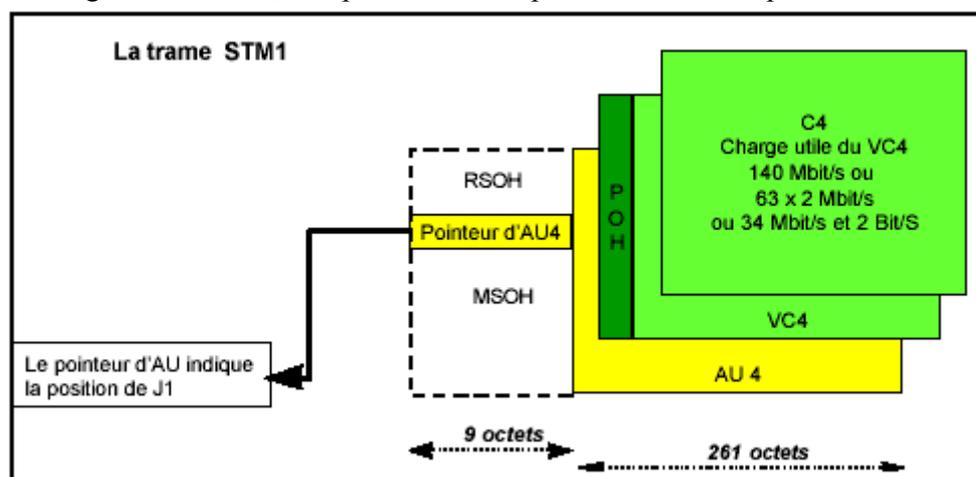


Figure n°26 : La trame de base STM1

Le surdébit de conduit se décompose d'octets représentés sur la figure 11

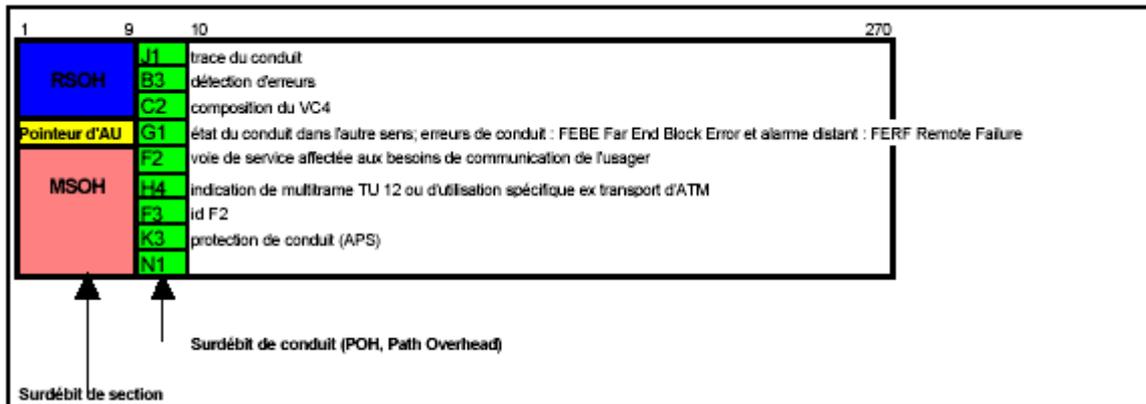


Figure n°27 : schéma d'ensemble

Les octets des surdébits de section

La trame STM-1 comporte deux types de surdébit de section : le surdébit de section de régénération et le surdébit de multiplexage. Ils peuvent être représentés comme ci-dessous :

Surdébit de section de régénération (RSOH)

A1	A1	A1	A2	A2	A2	J0	nu	nu
B1	X	X	E1	X	X	F1	nu	nu
D1	X	X	D2	X	X	D3	X	X

Surdébit de section de multiplexage (MSOH)

B2	B2	B2	K1	X	X	K2	X	X
D4	X	X	D5	X	X	D6	X	X
D7	X	X	D8	X	X	D9	X	X
D10	X	X	D11	X	X	D12	X	X
S1	Z1	Z2	Z2	Z2	M1	E2	nu	nu

Pour le RSOH, la signification des octets est la suivante :

- A1, A2, verrouillage de trame,
- J0, trace de section de régénération. Il est utilisé pour transmettre périodiquement un identificateur de point d'accès de telle façon que le coté récepteur puisse vérifier en permanence la continuité de la connexion
- B1 est utilisé pour la surveillance de la qualité de la section de régénération ce qui permet la localisation de défaut au niveau de la section de multiplexage.
- E1 et E2 permettent d'établir deux voies de service respectivement au niveau section de régénération et section de multiplexage. Ces voies de services peuvent être utilisées pour établir des communications téléphoniques le long de ces sections.
- F1 est utilisé pour des besoins particulier de l'utilisateur (à 64 kbit/s, puisqu'il s'agit d'une trame de 125 µs),
- D1 à D3 et D4 à D12, Data Communication Channel ou DCC, respectivement à 192 bit/s et 576 kbit/s, affectés à la communication de données de la section de régénération.
- K1 et K2 bits b1 à b5 (Automatic Protection Switching) permettent la sécurisation automatique d'une liaison

- L'octet K2 bits b6 à b8 (Multiplex Section Remote Defect Indication, MS-DRI) permet à la réception d'envoyer à l'extrémité émettrice, une indication de défaut.
- L'octet S1 (Synchronization Status) permet de décrire la qualité du signal reçu en ce qui concerne son usage pour les fonctions de synchronisation.
- L'octet M1 permet au récepteur d'envoyer à l'émetteur le nombre d'erreur.

Pour le MSOH, la signification des octets est la suivante :

- B2, trois octets réservés pour la détection des erreurs sur les bits de la section, (BIP 24)
- K1, K2, deux octets affectés à la commande de protection automatique,
- D4 à D12, 9 octets "DCC", (à 576 Kbit/s),
- S1, marqueur de qualité de la synchronisation,
- Z1, Z2, réserves,
- M1, FEBE du B2 distant.

D. Application : Insertion d'affluents dans une STM1

Insertion d'un affluent de 140 Mbit/s dans une STM-1

Tout d'abord, il faut élaborer le conteneur C4 comme le montre la structure du multiplexage synchrone après récupération d'horloge et la régénération de l'affluent. Le Conteneur C4 comprend 180 blocs de 13 octets chacun, soit au total 2340 octets ou 18720 bits, répartis en 9 lignes de 20 blocs. Sachant que la périodicité est de 125µs, on a un débit de 149,760 Mbit/s. Comme le débit du conteneur est supérieur au débit affluent de 139,264 Mbit/s (voir Structure), tous les bits ne seront donc pas utilisés pour transporter des bits d'information. Dans un bloc, il y a 13 octets répartis comme suit : 1 octet pour les bits d'indications tels que le bit de remplissage, de justification ou de sur débit, et 12 octets pour les bits d'informations de l'affluent. Ceci permet de voir qu'il y a en fait 17406 bits d'information dans le conteneur, soit un débit de 139,248 Mbit/s. Comme le débit de l'affluent est supérieur au débit d'information du C4, c'est une justification de type négative de 16Kbit/s. Pour obtenir un Conteneur Virtuel VC4, on rajoute un Sur débit de Conduit appelé POH, on obtient ainsi 1 octet de plus pour chaque ligne, soit 9 octets de plus par rapport à C4.

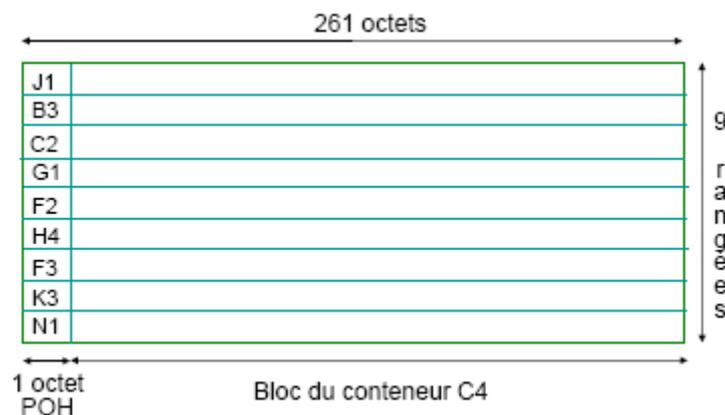


Figure n°28 : Conteneur virtuel VC4

Les octets du POH sont utilisés pour déterminer différentes informations sur le conteneur tel que :

- 1) la trace du conduit (J1) qui permet une identification du point d'accès pour vérifier la continuité de la chaîne de connexion depuis l'émetteur
- 2) la surveillance des erreurs par contrôle de bit du VC4 (B3)
- 3) l'étiquette du signal de conduit (C2) qui permet de connaître la composition du conteneur tel que le tableau suivant
- 4) l'état du conduit (G1) qui sert à renvoyer les informations de défauts de l'extrémité distante
- 5) le contrôle de qualité (F3)
- 6) la voie de service (F2) pour les besoins de communication de l'utilisateur sur le VC4.

La valeur octale de l'étiquette du signal de conduit est :

MSB	LSB	HEX	Composition du conteneur
0 0 0 0	0 0 0 0	0 0	Faisceau non équipé
0 0 0 0	0 0 0 1	0 1	Faisceau équipé non spécifique
0 0 0 0	0 0 1 0	0 2	Structure de TUG
0 0 0 0	0 0 1 1	0 3	TU verrouillé
0 0 0 0	0 1 0 0	0 4	Projection Asynchrone de trains à 34 ou 45 Mbps dans un C3
0 0 0 1	0 0 1 0	1 2	Projection Asynchrone de trains à 140 Mbps dans un C4
0 0 0 1	0 0 1 1	1 3	Projection de cellules ATM
0 0 0 1	0 1 0 0	1 4	Projection de MAN DQDB (MAN utilisant le mode Dual Queue Double Bus)
0 0 0 1	0 1 0 1	1 5	Projection de réseau local sur fibre optique FDDI

Figure n°29 : Etiquette signal de conduit

L'unité Administrative AU4 est constituée de l'ensemble VC4 et d'un pointeur associé, placé dans la trame de base STM1. Le VC4 ne coïncide pas toujours avec la capacité utile de la trame STM et se trouve en général à cheval sur 2 trames. Le Pointeur indique le nombre d'octet entre la fin de son dernier octet et le premier octet POH (J1) du VC4. Le pointeur peut aussi indiquer le début du VC4 modifier par une justification dans le cas où l'horloge du STM est différente de l'horloge du VC4 (débits différents) car le ralentissement ou l'accélération du débit du VC4 se fait en reculant ou en avançant le début du VC4. On dit que le VC « flotte » dans la trame. La trame STM-1 est constituée de l'ensemble AU4 et d'un sur débit de section SOH qui se décompose en deux sous ensembles : le RSOH et le MSOH.

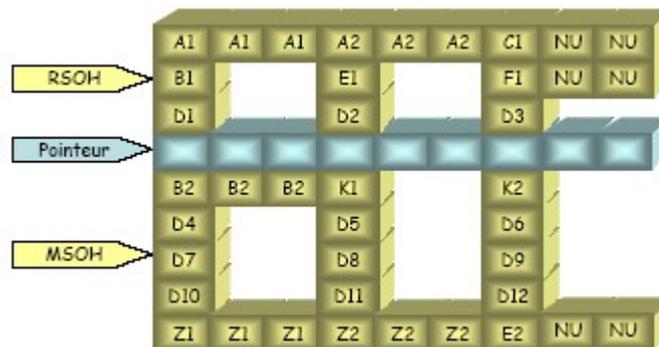


Figure n°30 : Trame STM-1

Dans le RSOH, les octets A1/A2 permettront de constituer le mot de verrouillage de trame, J0/C1 identifie AUG avant le multiplexage au niveau STM-N, B1 permet la surveillance des erreurs sur les bits de la section élémentaire régénérée, E1 est une voie de service pour des communications vocales entre régénérateurs et l'octet F1 est une voie de donnée entre régénérateurs réservés aux besoins particuliers de l'utilisateur.

Dans le MSOH, l'octet B2 permet la surveillance des erreurs sur les bits de la section de multiplexage, K1 et K2 sont affectés à la commande de commutation de protection automatique APS (Automatic Protection Switching 1+1 ou 1:n), les octets D4 à D12 forment un canal de communication de données DCC pour une section de multiplexage. L'octet contient des bits pour la description de l'état de la synchronisation, c'est-à-dire les quatre niveaux de synchronisation adoptés par le CCITT. L'octet E2 est une voie de service pour communications vocales entre multiplexeurs.

Pour certaines applications telles qu'une interface de section (jonction), on utilise une interface à fonction de sur débit réduite qui dépend du type de support physique (optique ou électrique) car on n'utilise pas tous les octets décrits ci-dessus comme B1.

Insertion d'affluent 34Mbit/s dans un STM1

Après la récupération d'horloge et la régénération de l'affluent à 34 Mbit/s, les données sont placées dans le conteneur C3. Ce conteneur de périodicité 125µs est formé de 9 lignes comptant chacune 84 octets, soit 756 octets ou 6048 bits, avec un débit de 48,384Mbit/s supérieur au débit de l'affluent donc tous les octets ne sont pas utilisés pour transporter des bits d'information. Le Conteneur C3 est partagé en trois parties T1, T2, T3, de 3 lignes chacune. Comme il n'y a pas assez d'octets de données on ajoute des bits de remplissage, donc le débit nominal de l'information dans du C3 passe à 34,344 Mbit/s. Le conteneur virtuel VC3 est obtenu en rajoutant à C3 un Sur débit de Conduit POH identique au POH du VC4. Le TU3 est constitué de l'ensemble du VC3 et d'un pointeur associé placé dans la capacité utile de la trame STM1. Le pointeur TU3 est identique au pointeur d'AU4 et joue le même rôle. Le TUG3 définit les emplacements des TU3 (VC3 et pointeurs associés) dans le VC4. Le VC4 formé de 3 TUG3 est obtenue en effectuant un multiplexage par entrelacement de colonnes des TUG3 A/B/C après avoir placé en tête du VC4 la colonne contenant le POH de VC4 et deux colonnes de remplissage.

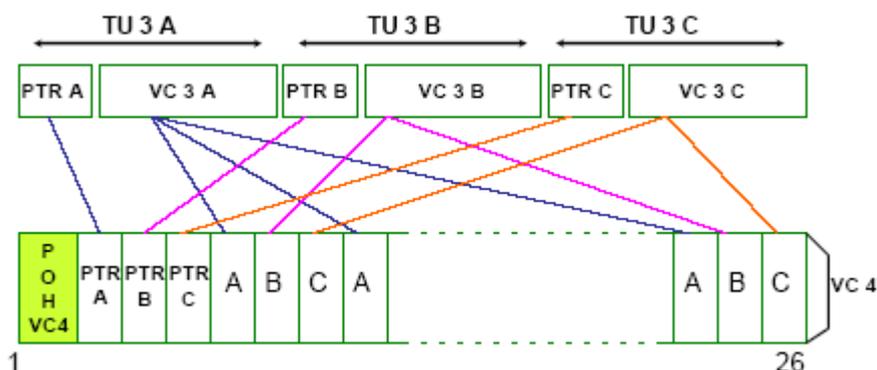


Figure n°31 : Mise en place d'un VC3 et intégration dans un VC4

Comme dans le cas d'un affluent à 140Mbit/s, l'AU4 est obtenue en associant un pointeur au VC4. L'AUG représente l'entité contenant l'AU4 et il sera placé dans le STM1 qui est obtenu

en rajoutant le SOH à l'AUG. On obtient un STM1 formé d'un AUG contenant un VC4 composé de trois TUG3 élaborés à partir de trois VC3 transportant trois affluents à 34Mbit/s.

Insertion d'affluent 2Mbit/s dans un STM1

Dans le cas d'un affluent 2Mbit/s, celui-ci peut être structuré (trame organisée en octets) ou non (suite de bits sans structure connue ou dont l'information de structure n'est pas utile à transporter). Ceci conduit à envisager différentes façons de réaliser la projection dans le conteneur C12. Si les bits sont mis dans le C12 au fur et à mesure de leur arrivée sans tenir compte de la composition en octets ou non, en trame ou non, on parle de projection asynchrone. L'adaptation du débit se fait par justification bit dans le C12 comme pour les affluents à 34 et 140 Mbit/s dans leurs conteneurs respectifs. On utilise dans ce cas un mode de multiplexage dit mode TU flottant, déjà décrit pour les VC3 et VC4, donc le début du VC est repéré par son pointeur.

Si chaque bit ou octet de l'affluent est directement accessible dans le conteneur, on parle de projection synchrone bit ou synchrone octet. Dans le cas de projection synchrone, on peut utiliser le mode flottant ou le mode verrouiller (chaque octet de l'affluent est situé à un emplacement déterminé et fixé dans le VC4. Dans ce cas l'utilisation d'un pointeur n'est, bien entendu, plus nécessaire. En mode flottant, l'horloge utilisée pour la projection synchrone octet peut être une horloge synchrone de celle de l'équipement de multiplexage H155 ou l'horloge à 2Mbit/s propre à chaque affluent. En mode verrouillé, la projection est réalisée avec l'horloge qui est à la fois synchrone de celle de l'équipement et de celle de l'affluent. La projection synchrone en mode verrouillé ne se conçoit donc que dans un réseau entièrement synchronisé. Ceci implique que le POH du VC soit remplacé par du remplissage, de même pour le pointeur PTR du TU12, et donc le POH du VC4 sera utilisé pour la gestion de tous les C12 qu'il contient.

Le C12 est constitué d'un ensemble de 139 octets en 4 fois 125 μ s, soit 500 μ s et non pas 125 μ s comme pour les C3 ou C4. Ceci permet de réduire la taille relative du sur débit par rapport au signal utile transmis.

En mode TU flottant, le VC12 est obtenue en rajoutant, dans la période de 500 μ s, le POH de VC12 constitué d'octets nommés V5(surveillance des erreurs), J2(identification du point d'accès), N2(surveillance des connexion en cascade), K4(octet réservé pour un complément d'étude). Le TU12 est élaboré en associant au VC12, dans la période de 500 μ s, 4 octets nommés V1, V2, V3 et V4. V1 et V2 constituent le pointeur de VC12, V3 est l'opportunité de justification négative et V4 n'est actuellement pas utilisé (application future).

Le TU12 est ainsi constitué de 144 octets. Pour obtenir un TUG2 il faut multiplexer 3 TU12, puis pour obtenir TUG3, il faut multiplexer 7 TUG2, puis pour obtenir un VC4 il faut ajouter un POH à un multiplexage de 3 TUG3 comme pour le cas de l'insertion du 34Mbit/s. Ainsi on obtient pour le AU4 un multiplexage de 63 trains à 2Mbit/s.

Les débits normalisés et les termes utilisés en SDH (et la correspondance SONET)

Principaux Débit	SDH	charge utile	désignation anglaise	Multiplex. démultipl.	(SONET) ⁶	
					optique	commun
2 Mbit/s		VC12	E1		I	
34 Mbit/s		VC3	E3		I	
51 Mbit/s					OC1	STS 1
155 Mbit/s	STM 1	VC4	E4	ADM 1	OC3	STS 3
622 Mbit/s	STM 4			ADM 4	OC12	STS 12
1240 Mbit/s					OC 24	STS 24
2,5 Gbit/s	STM 16			ADM 16	OC48	STS 48

Le réseau de transmission de Télécom Développement comporte ainsi une structure d'anneaux primaires à 2,5 Gbit/s, qui transportent des VC 4 (155 Mbit/s) et des structures d'anneaux secondaires qui transportent des VC 12, VC 3 et VC 4 (2, 34 et 155 Mbit/s). Chaque AU 4 peut contenir 63 circuits 2 Mbit/s, 3 circuits 34 Mbit/s ou 45 Mbit/s ou 1 circuit 140 Mbit/s. Ces canaux permettent la constitution de circuits pour le service de voix commercialisé par "le 7", les commutateurs voix et données de Cegetel Entreprises et les commutateurs "MSC" de SFR, ou les clients autres, à savoir les opérateurs. Pour bien réaliser ce que représentent ces débits, il faut rendre le cas de la transmission de la voix :

- un canal à 2 Mbit/s, ou MIC₇, transporte 32 canaux téléphoniques ou IT,
- 155 Mbit/s transporte 1 x 63 MIC (avec les canaux de service), ou encore environ 1900 IT.
- 2,5 Gbit/s théoriquement près de 30 000 IT.

Les équipements mis en oeuvre

Les équipements SDH ont été conçus pour remplir les principales fonctions à assurer par le réseau :

- satisfaire la demande : fourniture rapide des capacités aux clients (circuits loués, RTC, ...)
- router le trafic de manière efficace en optimisant la capacité disponible : **Consolidation** c'est-à-dire le trafic de supports faiblement chargés est rassemblé sur un même support de manière à augmenter l'efficacité et le **grooming** c'est-à-dire les trafics multi-services ou multi-utilisateurs véhiculés sur différents supports sont triés suivant le service et routé vers la destination du service.
- permettre la gestion du réseau et du trafic : maintenance et réparation, rétablissement rapide des conduits.

a) Multiplexeur SDH

La fonction de base assurée par le multiplexeur consiste à charger (à l'origine) et à extraire (à l'arrivée) les affluents des différents clients qui ont été assemblés dans les trames STM-n véhiculée par le réseau.

Le mécanisme des pointeurs permet d'extraire ou d'injecter aisément un affluent dans un multiplex. Cette fonction est assurée par un élément appelé multiplexeur SDH à injection/extraction **MIE** et plus généralement **ADM** (*Add Drop Mux*).

Les multiplexeurs dits MUX terminaux ou accès, permettent la projection et le multiplexage des affluents PDH, des affluents produits par d'autres standards (ATM, FDDI, ...) et des affluents SDH pour constituer des trames STM-n. Ils assurent évidemment l'opération inverse. Une application courante est la collecte et la restitution par un réseau SDH des flux de données des clients.

Les multiplexeurs dits 'HUB MUX' permettent d'interconnecter du trafic transporté sur des fibres ou sur des anneaux. Ils sont utilisés dans une structure en étoile. Des liaisons intermédiaires entre hub permettent également de restaurer le trafic via des routes alternatives.

b) Brasseurs

Les brasseurs numériques **S-DXC** '*Synchronous Digital Cross Connect*' permettent de ré-arranger les affluents dans les trames STM-n et de commuter (c'est-à-dire brasser) des VC's dans des multiplex d'entrées avec des multiplex de sortie.

Les fonctions de brassage peut être intégrée dans les ADM's et donc distribuées dans le réseau. Il existe aussi des équipements brasseurs autonomes : DXC 4/4 et DXC 4/1 : le 1^{er} chiffre indique le niveau maximum de VC présent sur les entrées et le 2nd chiffre indique le plus bas des VCs qui peut être manipulé et donc commuté.

Le DXC 4/4 accepte généralement, outre les entrées STM-n, des entrées 140 Mbit/s. Il peut commuter les VC4's/ C'est un équipement que l'on va trouver dans la partie haute du réseau de transmission en particulier pour du routage et les protections/restaurations des grandes routes de l'information.

Le DXC 4/1 accepte généralement les entrées/sorties STM-n et aussi des E1. Il peut commuter les VC12's. Il est mis en œuvre en des points où une très grande flexibilité est requise.

ç. Architectures des réseaux et dispositifs de protections

Les caractéristiques des architectures de réseau en SDH sont déterminées à partir d'une nécessité de respecter le débit et le synchronisme des flux de bits à transporter, en un minimum de temps. A cela s'ajoute la capacité que peut avoir un réseau à pallier automatiquement ses défaillances, pour assurer le transport de données.

La structure en anneau (ring) a pour principal but de fiabiliser les transmissions en palliant les dégradations de qualité de transport soit relative au support, soit consécutive à des multiplexage. Pour fiabiliser la transmission, le choix se porte sur un anneau à 2 ou 4 fils. L'avantage du 4 fils est de définir deux sens (bi-directionnel) et d'avoir deux fibres de secours (une pour chaque sens) qui peuvent éventuellement porter un trafic supplémentaire.

çI. WDM

L'utilisation de la SDH et de la fibre optique a apporté un début de réponse à la demande de bande passante. Toutefois, la SDH utilisant une seule longueur d'onde comprise entre 1330 nm et 1550 nm, la bande passante de la fibre optique n'est pas exploitée complètement. Pour amplifier fortement l'utilisation de la bande passante, des technologies photoniques complètent le réseau de transport SDH. La technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) multiplexe 8, 16, 32 à 64 longueurs d'onde dans une seule fibre (équivalent à un multiplexage en fréquences). Chaque longueur est espacée de 0.8nm voir 0.4nm. La plage des longueurs d'onde utilisée est comprise entre 1530 et 1565 nm car elle permet une meilleure stabilité du faisceau lumineux et une faible dispersion chromatique. Les opérateurs peuvent ainsi transporter plusieurs flux SDH STM16 à 2,5Gbits ou STM64 à 10Gbits (ou autres par exemple FDDI) sur une fibre optique. Les débits obtenus sont de l'ordre des téra bits par seconde. En multiplexant 16 STM64 dans de la fibre, on obtient 2 millions de communications téléphoniques simultanées. Le WDM est utilisé depuis plusieurs années dans les réseaux de transmission SDH trans-océaniques tels TAT12/13, AFRICA ONE, FLAG, SEA ME WEA. Cette technologie est maintenant utilisée au niveau des réseaux de transmission SDH terrestre. Pour un opérateur, le WDM permet un gain au niveau coût des travaux de génie civil pour car il permet d'éviter la pose de nouvelles fibres optiques. Avec le WDM, une nouvelle couche optique apparaît dans les réseaux des différents opérateurs. Dans les prochaines années, nous verrons apparaître des commutateurs optiques qui permettent de brasser les différentes longueurs d'onde. Ils permettent ainsi aux opérateurs de bâtir des réseaux maillés tout optique.

Le réseau national est constitué de liens reliant les grandes agglomérations régionales. Il utilise les technologies SDH et WDM selon les capacités à transmettre (depuis 2,5Gbits/s jusqu'à 200Gbits/s).

Le réseau régional relie les villes moyennes à l'agglomération régionale, à l'intérieur d'une région. Il utilise essentiellement la technologie SDH..

Le réseau départemental relie les petites villes au chef lieu de département. Il utilise principalement, selon la capacité à transmettre et l'infrastructure existante, la technologie SDH (débits de 155Mbits à 622Mbits/s) ou les faisceaux hertziens (débits $N \times 2\text{Mbits/s}$ ou 155Mbit/s).

Le réseau métropolitain est déployé à l'intérieur des grandes agglomérations. Il utilise les technologies SDH (débits 2,5Mbits/s) et WDM (Débits 80Gbits/s).

Le WDM est également utilisé pour la communication transatlantique et transpacifique.

Les systèmes WDM / DWDM commercialisés aujourd'hui comportent 4, 8, 16, 32, 80 , voire 160 canaux optiques, ce qui permet d'atteindre des capacités de 10, 20, 40, 80, 200 voire 400 Gb/s en prenant un débit nominal de 2,5 Gb/s et de quatre fois plus avec un débit nominal de 10 Gb/s. Ainsi, on obtient 3200 Gb/s (3,2 Tb/s) avec 80 canaux optiques à 40 Gb/s.